



HAL
open science

Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural Définition d'une approche hybride pour la reconstruction 3D d'édifices

Livio De Luca

► **To cite this version:**

Livio De Luca. Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural Définition d'une approche hybride pour la reconstruction 3D d'édifices. Sciences de l'Homme et Société. Arts et Métiers Paris-Tech, 2006. Français. NNT : 2006ENAM0009 . tel-00263717

HAL Id: tel-00263717

<https://pastel.hal.science/tel-00263717>

Submitted on 13 Mar 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Centre d'Aix-en-provence

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de

**L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
D'ARTS ET MÉTIERS**

Spécialité : Conception

par

Livio DE LUCA

**RELEVÉ ET MULTI-REPRÉSENTATIONS
DU PATRIMOINE ARCHITECTURAL**
Définition d'une approche hybride de reconstruction 3D d'édifices

Soutenue le 31 mars 2006 devant le jury composé de

M-F. COUREL	Directeur d'études, EPHE	Rapporteur
M. FLORENZANO	Directeur de recherche, CNRS	Directeur
H. LE MEN	Ingénieur général des Ponts & Chaussées	Rapporteur
F. MERIENNE	Professeur d'Université, ENSAM,	Examinateur
C. SINTES	Conservateur en chef	Examinateur
P. VERON	Maître de Conférences, ENSAM	Co-directeur

En mémoire de Flora Borrelli

Remerciements

Je tiens à remercier :

Michel Florenzano, pour m'avoir accueilli dans le laboratoire qu'il dirige, pour son suivi dans mon travail de thèse et pour m'avoir offert la possibilité de participer à des nombreuses expériences au cours de ces trois ans. *Philippe Véron*, pour son aide constant et minutieux tout au long du développement et de la rédaction de la thèse. *Jean-Yve Blaise* et *Iwona Dudek*, véritables sources d'inspiration de mon travail.

Michel Berthelot, pour m'avoir donnée la possibilité d'évaluer certains aspects de mon travail avec des étudiants de la formation qu'il dirige ainsi que pour ses conseils dans diverses expériences. *Meneould Chataignier*, pour l'amitié qu'elle m'a montrée tout au long de mon séjour en France ainsi que pour son aide dans la correction du manuscrit. Tout le personnel du laboratoire pour leur suivi au cours de mon travail de thèse.

Claude Sintès et *Fabrice Denise* pour leur assistance au cours des travaux menées sur le théâtre antique et au Musée d'Arles. *Georges Puchal* pour ses conseils autour de la valorisation du Patrimoine Architectural. *Jean-Marie Besnier* et *Jean-Pierre Dalbera* pour leurs conseils autour du partage des ressources culturelles sur Internet.

Xin Chen, pour ses conseils autour des dispositifs d'acquisition laser 3D. *Stephane Nullans* pour ses conseils autour de la photomodélisation.

Rosario Giovanni Brandolino, *Giovanna Brambilla*, *Giusy Botto*, *Domenico Cogliandro*, *Isidoro Pennisi* et *Michele Restuccia*, pour leur enseignements au cours de mes études universitaires en Italie et particulièrement *Antonio Quistelli* : mon 'Maestro'. *Alberto Sdegno* pour m'avoir aidé à conduire une expérience autour du relevé du Couvent de la Charité de Palladio à Venise et pour les discussions autour de l'histoire de la représentation architecturale.

Tous les étudiants du laboratoire du laboratoire MAP et spécialement : *Chawee*, *Chiara*, *Meriem*, *Nicolas*, *Paola*, *Tudor* .

J'exprime la plus profonde reconnaissance à mes parents *Adriano* et *Pina*, pour m'avoir donnée de la confiance au moment de mon départ à l'étranger pour m'avoir soutenu au cours de ces années.

Je remercie enfin *Francesca* d'exister.

Résumé

L'acquisition des données spatiales en architecture a connu dans ces dernières années des progrès significatifs grâce à l'introduction de nouveaux instruments de mesure. Parallèlement, des techniques de traitements tridimensionnels (segmentation du nuage de points, maillage automatique, cartes de profondeur, modélisation paramétrique, photo-modélisation, etc.) permettent d'obtenir des supports d'analyse de l'objet à différents niveaux de détail et pour différentes finalités. Cependant, dès les premières étapes de traitement des données acquises, les problèmes de représentation s'imposent, car la démarche de reconstruction tridimensionnelle nécessite des interprétations géométriques pour décrire les d'objets architecturaux. Cette thèse propose une approche permettant de conduire les opérations de reconstruction 3D en faisant référence à un ensemble de connaissances historiques spécifiques au tracé des formes architecturales. Ainsi, un modèle de description sémantique sert de dénominateur commun entre différentes représentations et jeux d'informations extraites à partir du relevé. La maquette numérique ainsi obtenue a pour vocation d'être exploitée pour la constitution de banques de données patrimoniales. Dans ce cadre, une approche de structuration spatiale et architecturale de l'édifice a été développée. La maquette numérique ainsi structurée devient alors le support privilégié de navigation et d'interactions avec les sources documentaires qui lui sont associées. Ces informations et les représentations géométriques multiples des objets constituant l'édifice peuvent être restitués de manière dynamique en fonction de différents points de vue utilisateurs.

Mots-clés : Patrimoine architectural, relevé, description sémantique, multi-représentations, partage d'informations.

Abstract

The acquisition of the spatial data in architecture has known in these last years significant progress due to the development of new laser-based measuring techniques. In parallel, several geometrical three-dimensional processing techniques (point-cloud segmentation, surface reconstruction, depth maps, parametric modeling, image-based modeling, etc.) allow to produce 3D geometrical representations for the analysis of the object at various levels of details and for various purposes (real-time navigation, measurement and shape analyses, mechanical studies, etc.). However, starting from the 3D digitized point clouds, the representation problems are essential, because an efficient 3D reconstruction process of a building requires architectural knowledge interpretations to describe architectural objects. This thesis propose an approach to drive the 3D reconstruction operations using a whole of historical knowledge specific to the architectural forms layout. A semantic description model is used as common denominator between various geometrical representations and information sets extracted from the surveying process. The digital models obtained can be exploited for the constitution of patrimonial databases. Within this framework, an approach to structure the digital models witch describe the building according with spatial and architectural requirements has been developed. The digital mock-up thus produced plays a strategic role to support real-time navigation into the virtual representation of the building and to manage the interactions with its associated documentary sources. The documentary information and the multiple geometrical representations of the objects constituting the building can to be managed and updated in a dynamic way according to various user points of views such as.

Key words: Architectural heritage, surveying, semantic description, multi-representation, information sharing, digital mock-up.

Table des matières

1. Introduction	7
1.1 Contexte	7
1.2 Objectif	8
1.3 Portées, limites et apports principaux.....	9
1.4 Terrains d'expérimentation.....	9
1.5 Structure du document.....	9

Partie I..... 11

2. Outils et techniques pour l'acquisition, le traitement et le rendu de données tridimensionnelles..... 13

2.1 L'acquisition des données spatiales	13
2.1.1 Historique des méthodes de relevé architectural	13
2.1.2 L'acquisition photogrammétrique	14
2.1.3 L'acquisition par scanner laser 3D.....	16
2.1.4 Analyse comparative des deux systèmes d'acquisition	19
2.1.5 Collecte, organisation et extraction d'informations spatiales	20
2.2 La reconstruction tridimensionnelle des surfaces.....	22
2.2.1 Classification des représentations géométriques des surfaces	23
2.2.2 Techniques de reconstruction des surfaces à partir d'un nuage de points systématiques	25
2.2.3 Techniques de reconstruction manuelles à partir d'un ensemble de points pertinents	27
2.2.4 Techniques de reconstruction basées sur l'image	29
2.3 La restitution de l'apparence visuelle.....	31
2.3.1 L'acquisition d'informations photométriques.....	31
2.3.2 L'extraction et le plaquage des textures.....	32
2.3.3 Le rendu basé sur l'image	34
2.4 Conclusions	36

3. Une approche hybride pour la restitution tridimensionnelle du patrimoine bâti.. 39

3.1 Problématique	39
3.2 Approches actuelles pour le relevé et la représentation d'édifices	39

3.2.1	Approches visant à l'exactitude du modèle géométrique	40
3.2.2	Approches se basant sur des exigences de description	42
3.2.3	Approches visant à la restitution de l'apparence visuelle	45
3.2.4	Approches visant à la restitution de plusieurs aspects à la fois.....	48
3.2.5	Analyse critique des expériences présentées.....	50
3.3	Présentation de l'approche proposée	51
3.3.1	Préoccupations retenues.....	51
3.3.2	Structure de l'approche	52
3.4	Présentation de l'environnement de développement.....	55
3.4.1	MEL et C++	56
3.5	Conclusions	57

Partie II..... 59

4. Consolidation hybride de différentes sources 61

4.1	L'acquisition des données sur le terrain	61
4.2	Consolidation hybride de différentes sources	63
4.2.1	Conversion des nuages de points	63
4.2.2	L'orientation des photographies sur le nuage de points.....	63
4.2.3	L'extraction de coordonnées additionnelles.....	68
4.3	Extraction d'informations pertinentes	69
4.3.1	Extraction de profils au travers d'un plan d'intersection.....	70
4.3.2	Extraction de profils à partir d'une image rectifiée.....	71
4.3.3	Extraction de profils sur un support mixte (plan d'intersection/image rectifiée).....	72
4.4	Conclusions	75

5. Approche proposée pour la reconstruction de la morphologie de l'édifice..... 77

5.1	Introduction	77
5.2	Reconstruction des surfaces à partir d'informations pertinentes.....	78
5.2.1	Génération de surfaces à partir de profils	78
5.3	Outils de modélisation basés sur les connaissances architecturales	82
5.3.1	Introduction.....	82
5.3.2	Les moulures : unités atomiques de l'architecture classique.....	85
5.3.3	Formalisation de primitives architecturales	88

5.3.4	Instanciation des primitives sur le nuage de points	97
5.3.5	Modélisation de primitives architecturales par déclaration de moulures.....	99
5.3.6	Constitution d'une bibliothèque d'éléments	102
5.4	Reconstruction de bas-reliefs à partir d'un nuage de points systématique.....	105
5.4.1	Introduction.....	105
5.4.2	Démarche adoptée.....	106
5.4.3	Evaluation	108
6.	Structuration de la maquette et multi-représentation	111
6.1	Contexte.....	111
6.1.1	L'édifice comme système de connaissances architecturales	111
6.1.2	Les relations entre les éléments architecturaux	112
6.2	Description sémantique de la morphologie d'un édifice	115
6.2.1	La description sémantique par graphes tridimensionnels.....	116
6.3	Multi-représentations.....	119
6.3.1	Représentations basées sur les points	120
6.3.2	Représentations basées sur les courbes.....	123
6.3.3	Représentations basées sur les polygones.....	125
6.3.4	Synthèse des représentations.....	128
6.4	Stockage et exploitation des représentations pour l'affichage 3D temps réel.....	130
6.4.1	Optimisation des maquettes pour l'affichage 3D en temps réel	130
6.4.2	Conservation et exploitation des représentations géométriques	130
6.4.3	Enregistrement des représentations dans une base de données	132
Partie III	135
7.	Structuration d'informations autour de la maquette 3D	137
7.1	Etat de l'art des systèmes d'informations à l'échelle architecturale	138
7.1.1	Systèmes qui relient les informations associées autour d'un édifice entier	138
7.1.2	Systèmes qui relient les informations aux entités d'une représentation 2D	139
7.1.3	Systèmes qui relient les informations aux entités d'une représentation 3D	139
7.1.4	Systèmes qui structurent les informations autour d'un modèle de description de l'édifice.....	140
7.2	Proposition d'un système pour la consultation du relevé et des représentations	141
7.2.1	L'architecture du système	142
7.2.2	Présentation de l'environnement de développement	142

7.2.3 La scène 3D.....	143
7.2.4 La base de données	144
7.2.5 Le dialogue entre les parties du système.....	144
7.3 Outils pour la consultation du relevé.....	145
7.3.1 La prise de mesure interactive	146
7.3.2 Extraction de profils.....	147
7.3.3 Recherche du point de vue d'une photographie	148
7.4 Outils pour la construction d'un point de vue	148
7.4.1 Construction d'un graphe de description à partir d'un découpage morphologique.....	150
7.4.2 Nomenclature par thesaurus.....	150
7.4.3 Choix d'un système de représentation	151
7.4.4 Qualification des entités par attributs d'un domaine de connaissances spécifique.....	152
7.5 Consultation d'un point de vue.....	152
7.5.1 Recherche d'éléments de la morphologie à partir d'une requête dans la base de données.	153
7.5.2 Recherche d'informations à partir d'un point d'observation dans la scène 3D.....	154
8. Conclusions et perspectives	155
8.1 Limites	155
8.1.1 Consolidation hybride de différentes sources	155
8.1.2 Reconstruction des surfaces à partir de profils pertinents.....	155
8.1.3 Instanciation de primitives architecturales.....	155
8.1.4 Description sémantique de la morphologie de l'édifice.....	156
8.2 Perspectives de recherche	156
8.2.1 La documentation de l'état actuel de l'édifice	157
8.2.2 L'analyse de l'état de conservation de l'édifice	158
8.2.3 La formalisation des connaissances architecturales pour la compréhension et la restitution de la nature géométrique de l'édifice	158
8.2.4 La maquette 3D comme support pour la consultation, l'évaluation et le développement d'hypothèses de restitution	160
8.2.4 Terrains d'expérimentation	163
8.3 Réflexions conclusives	163
Bibliographie	165
Table des illustrations	173

Annexe A : NUBES forma - outil de reconstruction 3D d'édifices	177
Annexe B : NUBES visum - système de consultation	187
Annexe C : Terrains d'experimentation	193
Annexe D : Liste des publications	205

1. Introduction

1.1 Contexte

Les études sur le patrimoine architectural peuvent aujourd'hui être supportées par des reconstructions tridimensionnelles d'édifices réels. La maquette numérique 3D peut se révéler un support efficace pour documenter l'état actuel des édifices historiques mais aussi pour créer des ressources pour les chercheurs qui conduisent des analyses sur leur évolution historique. Dans le but de confirmer cette hypothèse, plusieurs problématiques doivent être abordées.

L'acquisition, le traitement et le rendu d'informations dimensionnelles concernant le patrimoine bâti a connu, dans ces dernières années, un progrès significatif grâce à l'introduction de nouveaux dispositifs de mesure et à l'exploitation de techniques numériques de traitement des données. Par contre, si certains de ces outils et techniques fournissent un degré d'automatisation de plus en plus important, beaucoup de problèmes restent ouverts si l'on essaie d'évaluer leur efficacité par rapport aux exigences qu'une représentation architecturale requiert. Dans le relevé, les résultats obtenus par les procédures de reconstruction automatiques consistent essentiellement en une interpolation géométrique de données métriques. En revanche, l'objectif d'une représentation en architecture est de conduire une lecture sémantique de données relevées au travers d'une interprétation géométrique de la forme qu'elles décrivent. Cela veut dire que pour être conforme aux objectifs d'une représentation architecturale, le processus de restitution tridimensionnel d'une réalité observée doit nécessairement faire référence à un univers de connaissances. Il est donc nécessaire de réaffirmer la distinction historique entre une phase d'acquisition et une phase d'interprétation des données tout en tenant compte des relations de dépendance qui existent entre ces deux étapes d'analyse. Dans ce sens, la mise en cohérence des procédures possibles de traitements numériques par rapport aux codes de la représentation architecturale forme un problème important qui doit être adressé.

Pour donner un exemple, beaucoup d'édifices patrimoniaux témoignent de l'utilisation intensive faite par leurs bâtisseurs de la notion de moulure. L'importance de cette notion est, dans la théorie architecturale, largement établie : elle y est décrite d'abord comme un outil essentiel dans la composition des formes, mais également comme le moyen par lequel la forme prend sens, par lequel la forme ajoute à ses propriétés géométriques des propriétés d'expression sensible (adoucissement, soulignement, etc.). Dans ce sens, la notion de mouluration pose de façon claire le problème plus large du rapport entre les déterminants géométriques de l'objet bâti et ses qualités architecturales.

De plus, la phase de relevé est juste le commencement du long processus qui caractérise la rédaction des documents montrant l'état actuel d'un édifice ou l'analyse des transformations qu'il a subies pendant son histoire. Différents traitements visent en effet, non seulement à collecter et à organiser les informations mais surtout à produire de la documentation pour différentes analyses spécifiques. Il apparaît donc essentiel d'étudier les conditions au travers desquelles des représentations multiples produites à partir du relevé, pourraient être organisées

autour d'un modèle de description de l'édifice. Cette deuxième problématique revient à considérer le modèle 3D interactif comme moyen d'accès privilégié à l'information. Ceci impose, à partir d'une analyse sémantique de l'objet, d'isoler une structure d'entités dont les représentations peuvent être organisées en fonction de plusieurs points de vue.

1.2 Objectif

L'objectif de ce travail de thèse est de spécifier une approche intégrée de restitution d'édifices patrimoniaux. Il s'agit premièrement du relevé de l'objet d'étude, ensuite de la construction de son modèle géométrique et son enrichissement pour constituer des représentations multiples. Cette problématique ainsi formulée implique que l'on soit capable, d'une part de gérer les informations relatives à la mesure de l'édifice et les connaissances applicables à sa restitution, et d'autre part de structurer et de représenter ces informations et connaissances pour les intégrer dans une base de données. Pour la définition de l'approche, une phase de recherche bibliographique a permis de présenter un état de l'art complet et une analyse des travaux dédiés aux techniques de relevé, de modélisation et de représentation.

Le travail effectué prend en compte quatre préoccupations distinctes :

Pour l'étape de **relevé**, l'approche devra prendre en considération l'intégration des moyens actuels d'acquisition de données 3D (balayage laser et photogrammétrie multi-vues) afin de définir leur niveau d'adaptation au problème du relevé architectural.

Pour l'étape de **modélisation géométrique**, il s'agira d'abord d'isoler de l'observation de l'objet la nature géométrique des éléments qui le composent et de définir des procédures appropriées pour leur reconstruction. Dans le cas spécifique des éléments typés (bases, chapiteaux, moulures, etc.) il s'agira entre autre, à partir d'une analyse des traités d'architecture, d'en extraire des règles, de les formaliser et d'en faire une traduction numérique exploitable dans le but de conduire la modélisation par une procédure d'instanciation de primitives architecturales.

Pour l'étape d'**enrichissement de la maquette**, l'approche introduit la notion d'objectif d'exploitation ou de point de vue qui conditionne les choix entre différentes représentations de l'objet. Le modèle géométrique associé à l'objet architectural devra être capable de supporter plusieurs représentations de l'objet (modèles multi-représentations) et des outils devront permettre de générer ces représentations et de les gérer. Ces différentes représentations pourront correspondre à différents niveaux de consultation et de compréhension requis en fonction du profil des utilisateurs et de leurs préoccupations.

Pour l'étape d'**exploitation de la maquette numérique** produite, l'approche proposée devra assurer la structuration en parties et sous parties du modèle de l'objet architectural et l'identification de leurs relations réciproques pour garantir la cohérence des informations produites au cours du processus de restitution. La maquette numérique résultante aura vocation à être exploitée pour la consultation des informations traitées. Ces informations et documents devront être associés à la description de l'objet de façon structurée et en fonction de différents points de vue.

Une **maquette informatique** intégrant les différents modèles et outils proposés sera présentée en annexe.

1.3 Portées, limites et apports principaux

Ce sujet de thèse se situe dans le cadre spécifique de l'acquisition de données dimensionnelles et de leur exploitation pour la représentation du patrimoine bâti. Dans ce contexte, nous avons centré notre attention sur le relevé d'édifices en élévation (on ne traitera pas les structures de fouilles) et plus particulièrement sur les éléments relevant d'une famille stylistique précise : le langage classique (dont on présentera les caractères généraux dans le chapitre 5). La problématique abordée est vaste car elle comprend différentes préoccupations. Dans ce sens, le premier apport de cette thèse est d'avoir identifié un processus qui mène de l'acquisition à l'exploitation des données dimensionnelles et de l'avoir structuré en phases. Chacune de ces phases révèle des problèmes spécifiques qui seront traités à travers la définition de méthodes, l'élaboration de formalismes et les développements informatiques. En conséquence, ce document est organisé à l'image du processus identifié présentant pour chaque problématique distincte un état de l'art et les apports produits.

1.4 Terrains d'expérimentation

Cette thèse a été financée par une bourse Région PACA autour du programme «Arles antique : un musée virtuel» qui a pour objectif de valoriser le patrimoine antique de la ville d'Arles selon des modalités nouvelles de transmission des connaissances venant compléter ou se substituer à la conservation des vestiges in situ et à leur présentation muséographique classique. Dans ce programme, plusieurs aspects concernant notre approche ont été évalués en exploitant des relevés élaborés sur les vestiges d'un théâtre romain et qui sont présentés en annexe.

Pour valider la généralité de l'approche proposée nous avons choisi d'appliquer les différentes étapes de la démarche développée à la restitution d'un échantillon représentatif du langage classique : un module de la façade du « Convento della Carità » à Venise. Il s'agit d'un cas emblématique où l'édifice fait l'objet à la fois d'une théorisation et d'une réalisation menée par le même auteur, Andrea Palladio. Cet échantillon présente des éléments d'ordre classique sur lesquels un discours sur la formalisation des connaissances sera mené. Enfin, dans le but d'explicitier la notion d'*objectif de représentation*, nous étendons notre discours à un ensemble de cas de figures rencontrés en différentes expériences conduites au sein du laboratoire MAP-Gamsau durant ces trois dernières années. Quelques images de ces travaux sont présentés en annexe.

1.5 Structure du document

Le document est organisé comme suit. Le chapitre 2 présente un état de l'art des outils et techniques numériques pour l'acquisition, le traitement et le rendu d'informations dimensionnelles. Le chapitre 3 présente les approches actuelles pour le relevé et la représentation architecturale et constitue une contribution de cette thèse dans la mesure où nous nous sommes efforcés de comparer un ensemble d'expériences en fonction de l'objectif qui les conduise et en montrant pour chaque expérience la façon dont les outils et les techniques présentés dans le chapitre 2 sont organisées en approches. Dans une deuxième partie de ce chapitre la comparaison de ces expériences justifiera, en la présentant de façon générale, l'approche méthodologique proposée.

La suite s'articule en deux parties distinctes. La première partie présente les problématiques ainsi que les apports concernant chaque phase de l'approche proposée. Le

chapitre 4 présente le problème de l'acquisition, la consolidation et l'extraction d'informations dimensionnelles et photométriques. Le chapitre 5 traite le problème de la reconstruction tridimensionnelle de la morphologie de l'objet architectural et se divise en trois aspects distincts : la reconstruction à partir d'informations pertinentes, les outils pour la reconstruction basée sur les connaissances architecturales, et la restitution des éléments de décor. Le chapitre 6 s'intéresse à la problématique de structuration de la maquette numérique de l'édifice et à la génération de représentations multiples en fonction d'un point de vue.

La dernière partie concerne la structuration des représentations autour d'un modèle de description de l'édifice étudié. Le chapitre 7 présente dans un premier temps un état de l'art des systèmes d'informations à l'échelle architecturale. Dans un deuxième temps, ces travaux sont comparés pour en extraire des principes guides pour un système de consultation en ligne du relevé et des représentations multiples d'édifices. L'architecture de ce système et ses principales fonctionnalités sont présentées. Finalement le chapitre 8 présente les conclusions, le bilan du travail et les perspectives de recherche. Le lecteur trouvera en fin de ce document, la bibliographie, la liste des illustrations et les annexes.

Partie I

2. Outils et techniques pour l'acquisition, le traitement et le rendu de données tridimensionnelles

L'élaboration de la maquette 3D d'un édifice passe par l'expression géométrique des objets qui le composent puis par la détermination de l'aspect de surface de ses différentes parties. Trois phases d'élaboration interdépendantes sont nécessaires :

L'acquisition des données spatiales. Il s'agit du relevé de la morphologie, des dimensions et des aspects de surface de l'édifice étudié. Cette phase peut utiliser différents dispositifs basés sur le principe de mesure par balayage laser 3D, ou sur la restitution photogrammétrique en différentes configurations. Le résultat de cette phase consiste en un nuage de points qui peut présenter des caractères de systématisme ou de pertinence en fonction de la modalité d'acquisition employée.

La reconstruction tridimensionnelle des surfaces. C'est l'étape de modélisation qui consiste à construire le modèle géométrique de l'édifice en s'appuyant sur les mesures issues de la phase de relevé. Plusieurs techniques permettent une reconstruction automatique, semi-automatique ou manuelle des surfaces à partir des nuages de points. Ces techniques diffèrent en fonction des données d'entrée qu'elles peuvent traiter et du type de représentation géométrique qu'elles peuvent générer.

La restitution de l'apparence visuelle. Dans cette phase on s'intéresse à l'enrichissement de la géométrie issue de la phase de reconstruction, par des attributs capables de décrire les aspects de surface. Il s'agit principalement d'associer au modèle 3D les informations photométriques acquises au moment du relevé.

Ces trois parties organisent les prochaines sections qui contiennent un état de l'art des outils et des techniques pour l'acquisition, la reconstruction et le rendu d'objets architecturaux.

2.1 L'acquisition des données spatiales

Dans cette première partie, après une petite introduction historique, nous nous intéressons aux systèmes actuels pour l'acquisition des données spatiales. Cette phase du relevé peut utiliser des dispositifs d'acquisition directe (scanners laser 3D), qui restituent en temps réel les points acquis sous forme de coordonnées, ou des méthodes d'acquisition indirectes (photogrammétrie), qui se basent sur l'exploitation du support photographique pour extraire les coordonnées spatiales à l'aide de différentes techniques de restitution.

2.1.1 Historique des méthodes de relevé architectural

Pour décrire l'histoire des méthodes et des outils pour le relevé architectural, [Saint-Aubin, 1992] identifie deux parcours parallèles d'évolution des modalités de collecte des données qui partent des principes introduits par Brunelleschi et Alberti au XV^e siècle et dont on peut suivre les évolutions jusqu'à nos jours. La première modalité utilise le plan de la

perspective pour mesurer les points dans l'espace, la seconde collectionne les orientations et note les distances. Les deux méthodes sont fondées sur le postulat du rayon visuel. Dans la première méthode, celui-ci est utilisé en intersection avec le plan de la perspective et définit la position des éléments qui composent la scène sur un support bidimensionnel. Dans la seconde méthode, plus abstraite, le rayon est utilisé pour viser les points caractéristiques de la scène ; les coordonnées sont alors exprimées en termes d'angles et de distances à partir d'une position connue (station). La première modalité a évolué grâce à l'introduction de la photographie, au travers des méthodes de restitution photogrammétrique, et s'est enrichie enfin avec l'intégration de la stéréoscopie. La seconde a aussi bénéficié de l'invention de nouveaux outils, par exemple le laser dans les années 70, qui a optimisé la mesure des distances. En observant l'évolution de ces méthodes et outils, on peut remarquer que le perfectionnement des systèmes s'est principalement intéressé à la recherche d'une meilleure précision, d'un niveau d'automatisation croissant et à une capacité plus élevée de mémorisation. Par conséquent, on comprend bien le rôle que l'informatique a pu jouer durant ces dernières années dans ce domaine. Les deux modalités n'ont jamais été prises en considération de façon indépendante. Dès l'origine et tout au long des 500 dernières années d'histoire du relevé d'architecture, diverses liaisons entre les deux méthodes ont été établies au travers d'intégrations techniques et d'approches de mesures. De plus, malgré l'évolution technologique, on peut remarquer que les principes sur lesquels se basent les instruments sophistiqués comme le scanner laser 3D ou les techniques émergentes de modélisation basées sur l'image, sont encore fondés sur ceux introduits respectivement par Alberti et Brunelleschi. En effet, comme on le verra dans les sections suivantes, la mesure des angles et des distances est le principe de fonctionnement du scanner laser 3D temps de vol, tandis que l'intersection entre les rayons visuels et les plans d'images reste la méthode exploitée pour la déduction des paramètres des caméras dans toutes les méthodes de restitution photogrammétrique.

2.1.2 L'acquisition photogrammétrique

« La photogrammétrie est la science ou la technique permettant d'obtenir des informations fiables sur l'espace naturel ou sur des objets physiques par l'enregistrement, la mesure et l'interprétation d'images photographiques » [American Society of Photogrammetry, 1980].

L'enregistrement photogrammétrique a utilisé pendant longtemps uniquement des chambres métriques et semi-métriques [Carbonnel, 1968]. Aujourd'hui, des images numériques peuvent être acquises directement par une caméra à matrice DTC¹. Qu'elles soient employées en configuration mono ou stéréo, en photogrammétrie, les chambres appartiennent à trois catégories principales [Grussenmeyer et al., 2001] : chambres métriques, chambres semi-métriques, chambres à DTC.

- Les *chambres métriques* terrestres offrent une orientation interne stable sur une longue période assurée par une réalisation optico-mécanique. Des repères de fond réalisent le système de coordonnées de l'image en garantissant une haute qualité géométrique.

1. DTC (en anglais CCD) : Dispositif à Transfert de Charge. Le capteur DTC est une matrice de certaine dimension composée de photosites. Les photosites sont de dimension, de forme et de matériaux différents. Le matériau de fabrication dicte la sensibilité aux bandes spectrales. Cette sensibilité varie avec la longueur d'onde pour un même matériau. Les photosites convertissent en variation de courant les photons de l'image, c'est à dire l'effet photoélectrique. La sensibilité du photosite est sa capacité de convertir un photon pour un électron. Les photosites de la matrice sont lus ligne par ligne et digitalisés.

- Les *chambres semi-métriques* projettent, lors de l'exposition, une grille de repères étalonnée sur le film. Les distorsions qui se produisent pendant l'acquisition, le développement ou le traitement de l'image, peuvent ainsi être compensées.
- Les *chambres à DTC* acquièrent directement des images numériques. Ces chambres, qui ne requièrent pas la phase de développement, offrent un contrôle direct de la qualité de l'image acquise et ont de bonnes caractéristiques géométriques.

2.1.2.1 L'orientation externe et interne

Le principe fondamental sur lequel la mesure à partir des photographies se base est la déduction des paramètres d'orientation externes et internes de l'appareil photo [Kraus et al., 1997]. L'orientation interne consiste à fixer la position du centre de projection par rapport au support de l'image (pellicule ou capteur DTC) et à chiffrer la distorsion, ce qui correspond au calibrage de la caméra. L'orientation externe détermine la position et l'orientation de la caméra dans l'espace-objet. On détermine six paramètres (trois pour la position et trois pour l'orientation dans l'espace).

Orientation interne. Les caractéristiques optiques de l'appareil photo peuvent être déterminées par l'étalonnage de l'objectif et constituent l'expression de ses distorsions systématiques. Les distorsions peuvent être de l'ordre de 1 à 5 microns pour des objectifs métriques ou dépasser les 100 microns pour des appareils d'amateur. Parmi les différentes solutions disponibles pour l'étalonnage des appareils photo, les plus récentes consistent à calculer les caractéristiques optiques à partir de l'acquisition photographique d'une mire plane. En comparant les mesures de la mire avec ses projections sur l'image on détermine : la distance principale (ou focale de l'objectif), les coordonnées du point principal (centre de l'objectif projeté sur le fond de la chambre) et les paramètres de distorsion qui correspondent aux erreurs de représentation introduites par les imperfections de l'objectif.

Orientation externe. L'orientation externe exprime la position et l'orientation de l'appareil photo au moment de la prise de vue. Différentes méthodes ont été développées pour déterminer ces paramètres. [Al Khalil et al., 2002] en proposent une classification basée sur trois groupes.

- Les méthodes approximatives, qui sont destinées au calcul des valeurs approchées des paramètres extrinsèques nécessaires pour les méthodes itératives rigoureuses.
- Les méthodes basées sur les conditions photogrammétriques fondamentales (colinéarité, coplanarité, coangularité).
- Les méthodes projectives, issues du domaine de la vision par ordinateur, qui expriment le modèle de la caméra à l'aide de coordonnées homogènes.

2.1.2.2 La restitution photogrammétrique

La restitution photogrammétrique permet d'extraire des images un ensemble de coordonnées exprimées dans l'espace-objet. Ces méthodes diffèrent en fonction de la configuration de l'acquisition : mono, stéréo ou multi images [Grussenmeyer et al., 2001].

Restitution à partir d'une seule image. La restitution à partir d'images isolées de parties planes d'un objet s'appuie sur la mesure d'un certain nombre de point. Pour développer un redressement (ou une rectification), on considère, par approximation, que la surface est définie uniquement par des plans identifiés par un minimum de quatre points d'appui. L'homographie

est l'équation projective qui établie la relation entre le plan de l'objet et le plan de l'image.

Restitution à partir d'un couple d'images. La restitution à partir d'un couple d'images utilise une configuration stéréo. En phase d'acquisition, les chambres (avec une orientation interne connue et étalonnée et une distorsion négligeable de l'objectif) sont presque parallèles entre elles. Dans les solutions de restitution numérique, l'observation stéréoscopique consiste en un système d'asservissement en temps réel qui agit sur l'un des clichés et qui prend en compte les paramètres d'orientation internes et externes des perspectives. Ce dispositif commande les déplacements en translation du deuxième cliché en fonction de la position observée sur le premier de façon à ce que les deux points observés soient toujours homologues. Ce mécanisme permet à l'opérateur de réaliser des représentations bidimensionnelles de façades, ou des modèles filaires et surfaciques en trois dimensions. Les formes arbitraires peuvent être reconstruites par des techniques de corrélation d'images automatiques. Ces techniques s'appuient sur l'analyse d'image et permettent d'extraire de façon automatique ou semi-automatique un ensemble de points détectés sur les variations chromatiques des surfaces.

Restitution à partir d'un bloc multi-image. La restitution à partir d'un bloc multi-image peut utiliser des photographies convergentes, horizontales, verticales ou obliques. La restitution se base sur l'ajustement des blocs d'images par la méthode des faisceaux (conditions de colinéarité) à partir d'un ensemble de correspondances (points, lignes) sélectionnées sur les photographies. Un des principaux avantages des méthodes basées sur ce principe est la possibilité d'exécuter un auto-étalonnage de la chambre directement à partir de photos de l'objet. En effet, une première solution de calibration déterminée, l'ajout de correspondances permet d'affiner le calcul des paramètres (externes et internes) par minimisation d'erreur. Cette approche n'est donc pas limitée à des chambres métriques ou étalonnées ce qui la rend beaucoup plus flexible. Les résultats de la photogrammétrie multi-image peuvent être des modèles filaires en 3D ou des photomodèles (représentations géométriques enrichies par les textures) dont on parlera de façon plus approfondie dans le paragraphe 2.4. La figure 1 illustre une représentation schématique des trois techniques de restitution décrites.

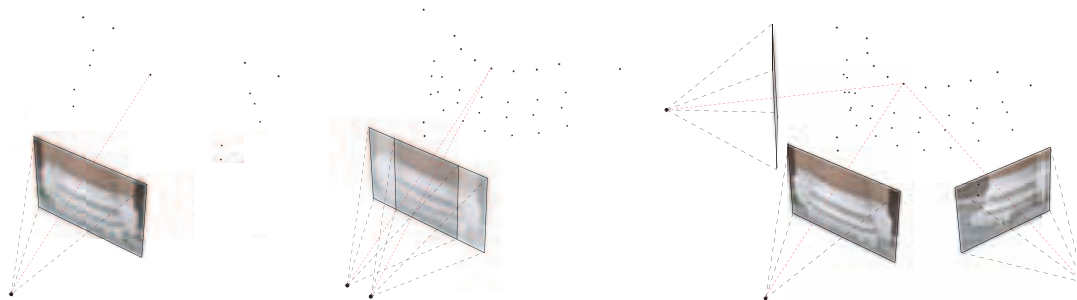


Figure 1. Schéma représentant les trois techniques de restitution photogrammétrique. De gauche à droite : la restitution à partir d'une seule image, d'un couple d'images et d'un bloc multi-image.

2.1.3 L'acquisition par scanner laser 3D

Le balayage laser terrestre est « utilisation d'un dispositif basé au sol, qui utilise un laser pour mesurer les coordonnées tridimensionnelles d'une région donnée de la surface d'un objet de façon automatique, dans un ordre systématique et à un taux élevé de vitesse, près du temps réel » [Boehler et al., 2002a]. Les modules de balayage laser permettent une acquisition directe de milliers de coordonnées par seconde. Au-delà des coordonnées spatiales (x,y,z), certains dispositifs de balayage permettent aussi d'acquérir les valeurs d'intensité (valeur exprimant la

réponse du matériau au faisceau laser dans une nuance de 255 niveaux de gris) et les valeurs colorimétriques (valeurs RVB extraites à partir d'une caméra calibrée embarquée dans le module de balayage). Comme dans le cas de l'acquisition photogrammétrique, presque aucun système de balayage laser ne peut accomplir toutes les exigences d'un relevé d'architecture. En effet, la variété d'objets qu'un édifice peut présenter s'étendent des éléments architecturaux aux décors sculptés. Il est donc nécessaire de décrire les principes de fonctionnement de ces outils pour mieux comprendre leur adaptabilité aux différents cas de figure.

2.1.3.1 Les principes de fonctionnement

Les modules de balayage laser 3D applicables au relevé d'édifices se divisent en deux catégories principales. Les scanners à longue portée mesurent des angles horizontaux et verticaux et mesurent la distance en calculant le temps de vol ou en comparant le changement de phase de l'onde transmise et reçue d'un signal modulé. Les scanners par triangulation incluent une base et calculent le point d'impact du faisceau laser en utilisant une ou deux caméras DTC. Les deux principes sont différents soit en termes d'exactitude, soit en terme de portée. [Marbs et al., 2001] fournissent une description des principes de fonctionnement des scanners appartenants aux deux catégories. La figure 2 fournie une représentation schématique des deux principes de fonctionnement.

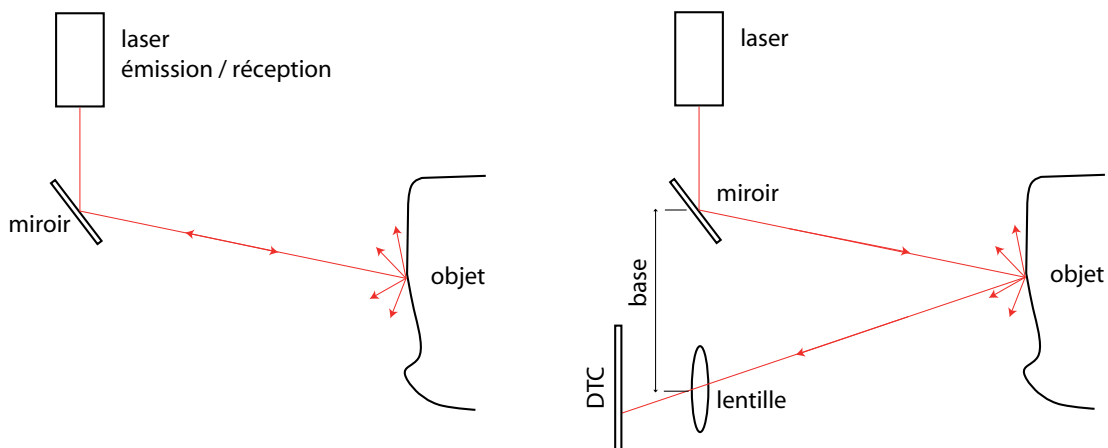


Figure 2. Illustration schématique des deux principes de fonctionnement des dispositifs de balayage laser 3D. À gauche le principe du temps de vol, à droite celui de la triangulation. [Marbs et al., 2001]

2.1.3.1.1 Scanners longue portée

Période de vol d'une impulsion laser. Une impulsion laser est envoyée à l'objet et la distance entre l'émetteur et la surface qui la réfléchit est calculée par rapport au temps de voyage entre la transmission et la réception du signal. Ce principe est bien connu des tachéomètres électroniques. Les systèmes de balayage utilisent des dispositifs tournants pour le déplacement angulaire du rayon laser (au moins pour un des deux angles).

Méthode de comparaison de phase. Cette méthode est également bien connue par les constructeurs d'instruments de tachéométrie. Dans ce cas, le faisceau transmis est modulé par une onde harmonique et la distance est calculée en utilisant la différence de phase entre l'onde transmise et reçue. En raison de l'analyse plus complexe du signal, ces modules peuvent être plus précis, mais avoir une portée plus réduite.

2.1.3.1.2 *Scanners par triangulation*

Systèmes à une seule caméra. Ce module de balayage se compose d'une base avec un dispositif de transmission envoyant un faisceau laser avec un angle défini, et à l'autre extrémité, une caméra DTC qui détecte le point d'impact du laser (ou la ligne) sur la surface. La position dans l'espace du point d'impact est dérivée de la mesure du triangle résultant. L'exactitude de la mesure d'un point diminue en fonction de la distance entre l'objet et l'instrument. Néanmoins, ces instruments jouent un rôle important pour des distances courtes et de petits objets où ils sont beaucoup plus précis que les modules de balayage à longue portée.

Systèmes à deux caméras. Une variante de ce type de dispositif est l'utilisation de deux caméras DTC positionnées sur chaque extrémité de la base du module. Le point qui doit être détecté est produit par un projecteur séparé. Le principe géométrique est le même que celui des modules utilisant une seule caméra et les résultats ont les mêmes caractéristiques d'exactitude. La seule différence consiste en un taux d'acquisition plus élevé.

2.1.3.2 La précision et le niveau de détail

[Bohler et al., 2003] présentent une analyse comparative de la précision des scanner 3D disponibles actuellement sur le marché. Dans la documentation du patrimoine architectural, un écart de quelques millimètres pour un seul point balayé n'est pas trop important si ce point fait partie d'un élément à géométrie régulière (plane, cylindrique ou analogues) et si le relevé sert juste à récupérer les paramètres qui décrivent cet élément dans une représentation bidimensionnelle. Par contre, si des surfaces irrégulières doivent être modélisées (habituellement par une représentation polyédrique fine), les nuages de points bruités peuvent causer différents problèmes en phase de traitement. Par conséquent, le procédé de balayage devrait être réalisé avec le dispositif le plus précis disponible pour la taille de l'objet à numériser et en fonction de la distance d'acquisition. On distingue alors trois cas de figure :

- De 0.1 à 2m pour les décors fins comme les bas-reliefs ou les sculptures.
- De 2 à 10m pour les éléments architecturaux décorés d'une certaine grandeur.
- De 10 à 200m pour la composition générale.

Pour les deux premières catégories, les scanners par triangulation sont actuellement le choix optimal : ces modules ont une marge d'erreur de 0.1 à 0.5 millimètres entre 0.1 et 2 mètres environ et de 0.5 à 2 millimètres entre 2 et 10 mètres environ. Pour de plus grandes distances, les scanners temps de vol sont les plus adaptés, rapportant une exactitude de quelques millimètres à quelques centimètres en fonction de la distance du point acquis comprise dans la portée fournie (entre 2 et 200 mètres environ). Dans les deux cas, comme il s'agit de dispositifs tournants, la résolution du balayage est exprimée en valeurs angulaires. Par conséquent, la densité de points acquis sur les surfaces impactées n'est pas homogène car elle varie en fonction de l'orientation du module. Ce problème, ajouté à celui des zones d'ombre, conditionne la stratégie du relevé et oblige à effectuer des balayages à partir de différents points de vue. [Bryan et al., 2004] fournissent une équation pour calculer la densité de points requise par rapport à la taille de l'objet à relever et au niveau de détail souhaité².

2. $Q=1-(m/s)$. Où Q est la qualité des données, m la densité de points sur l'objet et s la taille de l'entité minimale que l'on veut saisir. En utilisant cette formule une valeur peut être obtenue pour indiquer la probabilité qu'une entité spécifique soit détectée. Par exemple, une densité de 5mm sur une entité de 10mm de taille donnera une valeur de 0.5, c'est-à-dire le 50% de confiance. [Bryan et al., 2004].

2.1.4 Analyse comparative des deux systèmes d'acquisition

Plusieurs articles se sont concentrés sur la comparaison entre les méthodes d'acquisition photogrammétrique et le balayage laser [Guarnieri et al., 2004] [Fuchs et al. 2004]. La plupart de ces auteurs ont par contre conduit l'analyse des résultats fournis par les deux systèmes en prenant en considération le problème du processus de restitution 3D en entier. Notre intention est, au contraire, d'évaluer les deux systèmes exclusivement par rapport aux qualités et aux défauts que les nuages de points obtenus présentent après la seule phase d'acquisition. Cette distinction nous permettra, comme on le verra dans les sections suivantes, de regarder les techniques pour la reconstruction tridimensionnelle de façon isolée. Cela permettra d'en dégager les principes de base dans le but d'évaluer la meilleure façon de les intégrer. Pour comparer les deux systèmes d'acquisition nous nous appuyons sur trois critères distincts : l'archivage et la mémoire, la flexibilité de leur emploi et la variété d'information acquise. À titre d'exemple, la figure 3 illustre une comparaison des résultats du relevé de la même partie d'un édifice obtenus par une acquisition laser 3D temps de vol et par l'élaboration d'une mosaïque d'images redressées.

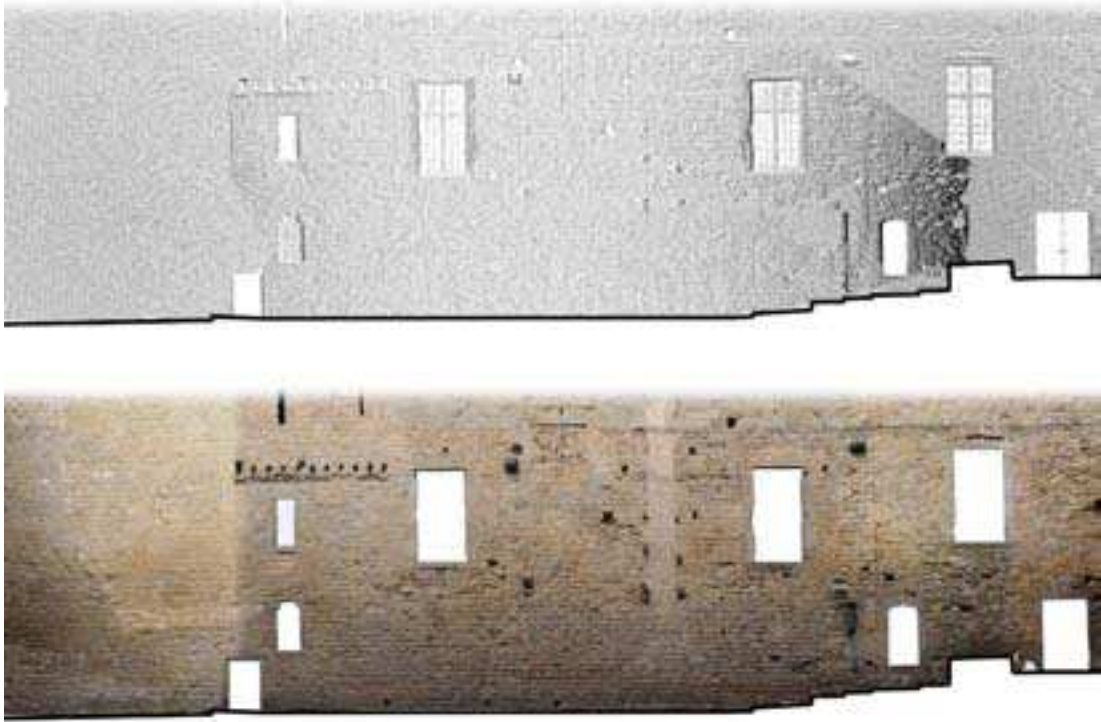


Figure 3. Le relevé de la cour du Midi du château Comtal à Carcassonne. En haut le nuage de points obtenu par scanner laser 3D, en bas une mosaïque d'images redressées. Image : Tudor Driscu, Map-Gamsau, 2005.

Archivage et mémoire. À l'exception des zones d'ombre, la photographie, comme le balayage laser donne une représentation complète de l'objet. La quantité d'informations enregistrées est énorme, bien souvent supérieure à celle nécessaire pour les premières exploitations. La différence fondamentale entre les deux systèmes est due aux modalités d'acquisition : le laser est une solution d'acquisition directe qui collecte et mémorise les données directement exprimées en trois dimensions et en temps réel, tandis que l'acquisition par photogrammétrie résulte de la mesure des objets sur plusieurs clichés et de calculs relativement lourds. Cette limitation est en même temps un avantage : en effet, la photographie est un document aisément

maniable, d'une grande fiabilité dans le temps et disponible facilement à tout moment pour des mesures complémentaires. Dans le cas de la stéréophotogrammétrie, cette information est conservée dans les clichés et peut être extraite, avec différents niveaux de d'approximation par rapport aux finalités de la restitution et aux types de représentation géométrique souhaitée. Au contraire, la quantité d'information présente dans un nuage de points issu d'un balayage laser est contrainte à la phase d'acquisition sur le terrain.

Flexibilité en phase d'acquisition. La mise en place sur le terrain d'une configuration d'acquisition photogrammétrique (mono, stéréo ou multi-image) est sûrement plus rapide par rapport à l'installation d'un scanner laser. Malgré la vitesse surprenante d'acquisition directe des dispositifs de balayage laser (5000 points à la seconde environ pour un scanner temps de vol), la quantité d'informations contenues dans une seule photographie (aujourd'hui jusqu'à 12 millions de pixels pour un reflex numérique), peut être beaucoup plus importante. L'acquisition photographique permet un déplacement plus facile autour de l'objet et augmente de façon considérable le nombre de prises de vue enregistrables sur le terrain. La vitesse d'acquisition d'un appareil photo (temps d'exposition) permet aussi l'enregistrement à partir de points de vue mobiles par rapport à l'objet (prises de vue aériennes à basse altitude par exemple).

Variété d'information acquise. Selon ce critère, il est évident que le degré d'automatisation du scanner laser offre la possibilité d'obtenir de façon directe des représentations exhaustives de la description géométrique tridimensionnelle des objets. Tandis que la photogrammétrie, même en étant un processus de mesure en trois dimensions, à l'exception de la restitution à partir d'un bloc d'images, est contrainte à la constitution de plans 2D. Ces plans ont par contre les qualités d'exhaustivité et de véacité provenant de la photographie. En effet, de ce point de vue les scanners (surtout à longue portée) ne sont pas encore performants dans l'acquisition des informations photométriques. Ces informations sont par contre extrêmement importantes pour documenter l'état de conservation des matériaux des édifices patrimoniaux.

2.1.5 Collecte, organisation et extraction d'informations spatiales

Comme nous l'avons vu, les différentes modalités d'acquisition basées sur l'image ou sur le balayage laser permettent l'enregistrement de régions d'objets avec différents niveaux de détail. Dans les deux cas (on pourrait aussi intégrer la mesure par tachéomètre, station totale, ou manuelle), on peut considérer le résultat de la phase d'acquisition comme un nuage de points. Pour comprendre les différences entre ces deux systèmes d'acquisition nous introduisons deux notions fondamentales pour comparer les nuages de points obtenus : systématisme et pertinence. Ces deux notions sont indispensables à la fois pour comprendre le dispositif d'acquisition à choisir pour un but spécifique mais surtout pour identifier une stratégie pour l'enregistrement exhaustif d'un ensemble architectural. La systématisme est la prérogative des dispositifs qui permettent une acquisition automatique et détaillée tandis que la pertinence est un facteur qui se manifeste dans les traitements manuels et qui dépend fortement de l'expérience de l'opérateur en phase d'acquisition ou de sélection des points. En effet, dans beaucoup d'applications, le lien entre la phase de mesure et de restitution est établi dès les premières opérations afin d'effectuer des mesures correctes et récupérer les informations nécessaires à la représentation [Gruen et al. 2002].

2.1.5.1 Nuages de points pertinents et systématiques

Les procédures d'acquisition automatisées ne prennent pas en compte habituellement les conditions géométriques de l'objet : il est donc souvent difficile de transformer les nuages

de points aléatoirement produits en structures polygonales ou en surfaces de haute qualité et sans perte d'informations importantes. D'autre part, si les mesures sont faites manuellement ou de manière semi-automatique, il y a une fiabilité plus élevée des mesures mais un plus petit nombre de points qui décrivent l'objet. La restitution photogrammétrique à partir d'une seule image utilise des points d'appui préalablement mesurés qui sont nécessaires aux opérations de redressement. L'extraction de mesures supplémentaires est donc toujours contrainte à l'orientation du plan choisi pour la rectification. Cela rend cette technique une solution valable exclusivement pour la restitution des éléments sur un support bidimensionnel même s'il est possible (en exploitant une collection de points d'appui supplémentaire) d'assembler différentes restitutions bidimensionnelles dans l'espace pour restituer une composition tridimensionnelle. Comme la restitution à partir d'une seule photo, la restitution d'un bloc d'images (dans les logiciels du marché) est une opération complètement manuelle qui permet de déterminer la position d'un ensemble de coordonnées dans l'espace une fois sélectionnées par l'utilisateur sur les photos. Le choix de ces coordonnées est conditionné à la fois par le but de la restitution, (production d'un plan, ou d'un modèle 3D), mais surtout par le type de représentation géométrique choisie (filaire, surfacique ou volumique). Il s'agit donc de sélectionner des informations pertinentes aux objectifs de la représentation.

En ce qui concerne le balayage laser et la stéréophotogrammétrie, le problème est inverse : pour la restitution des caractères descriptifs des éléments relevés il est nécessaire d'extraire des informations pertinentes d'un nuage de points systématiques. Ces systèmes de relevé permettent en effet d'acquérir une information redondante des surfaces à reconstruire. Or, même si les procédures de restitution automatiques (stéréophotogrammétrie ou balayage laser) peuvent produire les nuages de points très denses, des disparités, des points non pertinents et des parties absentes sont souvent constatés dans les résultats. Le même type de problème se retrouve dans les nuages de points acquis par relevé laser. Des traitements d'échantillonnage des nuages selon différents critères sont alors nécessaires. Ces procédés automatiques permettent de réduire la densité d'une zone du nuage (par critère spatial ou séquentiel) ou d'extraire des entités caractéristiques (analyse des discontinuités ou des valeurs d'intensités). On peut extraire aussi des informations pertinentes de façon semi-automatique ou manuelle. En stéréophotogrammétrie, l'analyse par corrélation permet de détecter sur un couple d'images les discontinuités qui décrivent la forme caractéristique d'éléments architecturaux. Ce type de filtre peut être aussi appliqué sur un nuage de points acquis par balayage laser en exploitant les informations sur les normales calculées au moment de l'impact du faisceau laser avec la surface. Des procédés manuels permettent enfin l'extraction de profils en utilisant des plans en intersection avec le nuage de points. Ces plans isolent les points compris dans une épaisseur (règlable) et offrent un support pour la reconstruction manuelle ou semi-automatique du profil décrit par des lignes ou des courbes.

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, le choix entre une acquisition systématique ou pertinente ainsi que leur intégration conditionne le développement d'approches pour le relevé et la représentation d'édifices.

2.1.5.2 La consolidation du nuage de points

Quel que soit le dispositif d'acquisition utilisé, une simple acquisition (à partir d'un seul point de vue) n'est jamais suffisante pour enregistrer un ensemble patrimonial. Différentes acquisitions sont alors nécessaires, surtout quand le but est d'enregistrer un bâtiment entier, ou

un site, à plusieurs niveaux de détail. Il est donc nécessaire de transformer les nuages de points collectés séparément dans un système de coordonnées unique. Trois stratégies sont possibles [Boehler et al., 2002b] :

- La collecte des données peut être accompagnée par une saisie de points d'appui au moyen d'un autre système de relevé (par exemple une station totale avec des coordonnées et une orientation connues) ;
- Des cibles (naturelles ou artificielles) peuvent être utilisées pour transformer les données acquises localement en fonction d'un système de coordonnées commun ;
- Des procédures automatiques de superposition de surfaces obtenues par maillage automatique (uniquement pour les objets de petite taille comme les sculptures ou les décors) peuvent être utilisées.

Pour les objets à l'échelle architecturale, la technique utilisée le plus fréquemment, est celle qui utilise des cibles. La figure 4 montre un résultat de consolidation obtenu par cette méthode. Ces points d'appui peuvent juste être des parties reconnaissables de l'objet (par exemple des coins) ou des cibles spéciales (sphères, cibles planes avec une réflectivité élevée) placées à des endroits judicieusement choisis. En ce qui concerne la première méthode, si la région acquise est assez grande, il y aura beaucoup de points disponibles pour assurer la robustesse géométrique de l'opération de consolidation. Malgré cela, il faut considérer que la propagation d'erreur peut être très importante quand il s'agit de considérer plus de deux stations. Dans la deuxième méthode, désormais supportée de façon complètement automatique, trois ou quatre cibles artificielles sont suffisantes pour obtenir une consolidation précise. Ces cibles pourront après être acquises aussi par des méthodes topographiques (théodolite, station totale) dans le cas d'un référencement local ou par des méthodes géodésiques (GPS - Global Positioning System) pour un référencement global.

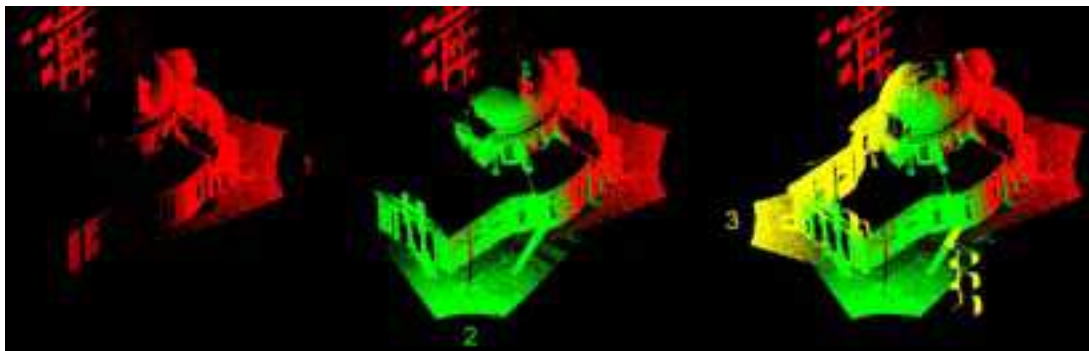


Figure 4. Consolidation du nuage de points de la chapelle de la Vieille Charité à Marseille. Image : équipe Map-Gamsau, 2003.

2.2 La reconstruction tridimensionnelle des surfaces

Habituellement, les nuages de points ne sont pas suffisants comme résultat final de documentation. Ils pourraient être considérés comme des moyens d'archiver la géométrie d'un objet en prévision d'exploitations futures. Le but de la reconstruction d'une surface à partir d'un nuage de points peut être énoncé comme suit [Remondino, 2003] : étant donné un ensemble de points P supposés décrire une surface inconnue S , créer un modèle de surface S'

qui approxime S . Dans ce but, beaucoup de techniques (automatiques, semi-automatiques et manuelles) existent aujourd'hui. Nous allons les présenter dans cette section en les regroupant en deux catégories principales :

- *Les techniques de reconstruction à partir d'un nuage de points systématiques* : il s'agit de procédures d'interpolation ou d'instanciation automatique ou semi-automatique qui utilisent comme données d'entrée un nuage de points issu d'un balayage laser ou d'une corrélation stéréophotogrammétrie ;
- *Les techniques de reconstruction à partir d'un nuage de points pertinents* : il s'agit de techniques d'approximation manuelles qui décrivent les surfaces au travers de la manipulation d'un certain nombre de primitives géométriques et de fonctions de modélisation.

Nous avons vu précédemment que la sélection d'informations pertinentes (choix du type d'acquisition ou des procédures d'échantillonnage) est une phase fortement conditionnée par les types de traitements que l'on peut appliquer sur un nuage de points. Avant de nous concentrer sur les techniques de reconstruction à partir d'un nuage de points systématiques ou pertinents, nous allons donc présenter une classification des représentations géométriques des surfaces.

2.2.1 Classification des représentations géométriques des surfaces

La représentation géométrique des formes conditionne la saisie des données d'entrée et les techniques applicables à leur modélisation. Par rapport aux propriétés descriptives et à l'organisation des paramètres qui les décrivent on distingue trois grandes familles de représentation géométrique :

Représentation filaire, qui décrit les objets par des sommets et des arêtes connectées, mais qui ne contient pas d'informations sur les faces et le volume de l'objet. Il s'agit des représentations normalement fournies par les logiciels de DAO.

Représentation surfacique, qui décrit le solide par un ensemble de surfaces, mais qui ne définit toujours pas la notion de volume.

Représentation volumique dont la plus utilisée est la CSG (Constructive Solid Geometry) qui est une composition de solides par des opérations ensemblistes et le modèle B-rep (Boundary representation) qui décrit un objet par la manière de relier les éléments de sa frontière.

Comme on s'intéresse aux techniques de reconstruction à partir d'un ensemble de coordonnées acquises, nous allons concentrer notre attention sur les deux types de représentation géométrique qui permettent de décrire des surfaces à l'aide de points de contrôle : les B-rep, les courbes et les surfaces paramétriques.

Représentation par frontières (B-rep). La représentation par frontières est la description d'un volume par un ensemble de polygones [Thalmann, 2003]. On entend par polygone une figure plane définie par une liste de points (sommets) reliés par des segments de droites (arêtes). Un volume est représenté par sa frontière, c'est-à-dire un ensemble de faces, reliées par des arêtes qui se rencontrent sur des sommets. La validité des solides est garantie par la loi d'Euler³ valable pour tout polyèdre régulier convexe simple. Concernant la reproduction des formes

3. **Loi d'Euler.** $V - E + F = 2$ où V est le nombre de sommets, E le nombre d'arêtes et F le nombre de faces.

complexes on peut dire que ce type de représentation consiste à ne stocker qu'un ensemble discret de points de la courbe (ou la surface) et à approximer la courbe (ou la surface) entre ces points, par des segments de droites (facettes polygonales).

Courbes et surfaces paramétriques. La modélisation d'objets complexes nécessite l'introduction d'éléments tels que courbes et surfaces [Thalmann, 2003]. Il s'agit alors souvent d'interpoler ou d'approximer des données d'entrée. Les objets sont restitués sous forme d'une succession de morceaux de courbes ou des mosaïques de carreaux de surfaces représentées paramétriquement⁴ (sur $[u_{\min}, u_{\max}]$ pour une courbe et $[u_{\min}, u_{\max}] [v_{\min}, v_{\max}]$ pour une surface). À partir d'un ensemble de points 3D on peut décrire une courbe ou une surface paramétriques par deux méthodes :

- Par approximation : la courbe ou la surface est définie par les points, mais ne passe pas nécessairement par eux. La surface est alors décrite par l'ajustement de quelques points de contrôle ;
- Par interpolation : la courbe ou la surface passe par tous les points d'entrée.

Par rapport à la méthode utilisée on distingue les courbes de Bézier, les B-splines (approximation) et les Cartmull-Rom (interpolation). À la différence des B-rep, les représentations paramétriques permettent d'utiliser des modèles d'ordre supérieurs (de degré 3 généralement) pour représenter les courbes et les surfaces. Cette caractéristique apporte un gain en espace-mémoire ainsi qu'une meilleure liberté de manipulation. Le polygone de contrôle utilisé pour manipuler les courbes devient un polyèdre de contrôle dans le cas d'une surface. La figure 5 illustre le même objet décrit par deux représentation géométriques différentes (polygonale et paramétrique).

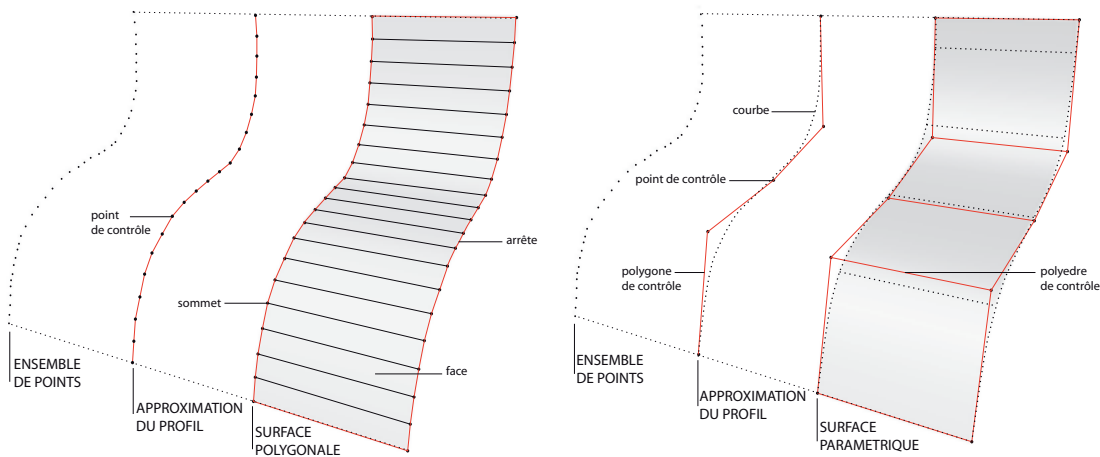


Figure 5. Deux types de représentation géométrique du même objet : à gauche une représentation polygonale; à droite une représentation paramétrique.

4. Représentation paramétrique d'une courbe. À partir de la représentation mathématique la plus simple on peut représenter une ligne en deux dimensions par l'équation : $y=2x$. La forme généralisée de ce type d'équation est $ax+by=c$ où $ax+by$ est appelé expression polynomiale. Le degré d'une équation polynomiale est le plus grand exposant dans l'équation. Dans le cas d'une ligne, l'exposant est égale à 1 et on dit que l'équation est linéaire. Si l'exposant est 2 l'équation est quadratique, s'il est 3 l'équation est cubique, etc.

2.2.2 Techniques de reconstruction des surfaces à partir d'un nuage de points systématiques

2.2.2.1 Les procédures de reconstruction automatiques

Le maillage polygonal est habituellement la méthode la plus adaptée pour représenter correctement les résultats des mesures, fournissant une description cohérente avec les données d'entrée. Beaucoup de méthodes ont été développées [Mencel et al., 1998] pour créer une représentation (triangulaire) régulière et continue de maille à partir d'un nuage de points. Une fois la surface polygonale déterminée, diverses techniques de post-traitement peuvent être employées pour l'optimisation du résultat : lissage, remplissage de trous, etc.. La conversion des données mesurées en une surface polygonale cohérente est généralement basée sur quatre étapes :

- *Pré-traitement* : dans cette phase on élimine des données bruitées ou bien on échantillonne le nuage de points pour réduire le volume de données à traiter et donc le temps de calcul ;
- *Détermination de la topologie globale de la surface de l'objet* : les relations de voisinage entre les parties adjacentes de la surface doivent être dérivées. Cette opération a besoin typiquement d'informations additionnelles (normales) pour la prise en compte de contraintes de discontinuité, dans le but de préserver principalement la définition des bords ;
- *Génération de la maille* : des mailles triangulaires sont créées répondant à certaines exigences de qualité, par exemple la taille et la forme des mailles ;
- *Post-traitement* : une fois le modèle créé, des opérations d'édition sont généralement appliquées pour raffiner et perfectionner la surface polygonale résultante.

Pré-traitement. Dans le cas des données acquises par un module de balayage, cette étape est obligatoire afin de réduire la redondance d'entrée (cas d'une surface acquise à partir de points de vue multiples) et d'éliminer une certaine quantité d'erreurs produites par le module de balayage [Floater et al.1998]. Pour la réduction du bruit de mesure dans un nuage issu de balayage laser, des méthodes statistiques sont appliquées prenant en compte la courbure extérieure du nuage et essayant de préserver les points mesurés. Pour les nuages obtenus à partir d'une corrélation d'images, les correspondances fausses peuvent être enlevées automatiquement [Borghese et al., 2000] ou



Figure 6. La restitution d'un décor sculpté par maillage automatique. Façade sur jardin de l'Hôtel de Sully à Paris. Image: équipe Map-Gamsau 2004.

manuellement par une inspection visuelle.

Maillage automatique. Une triangulation convertit l'ensemble des données d'entrée en modèle polygonal cohérent (maille). À titre d'exemple la figure 6 montre les résultats obtenus par une procédure de maillage automatique par triangulation 2D appliquée à la restitution d'un élément de décor. Cette opération divise les données d'entrée et produit des sommets, des arêtes et des faces (représentant la surface) qui se relient entre elles sur les bords partagés. Des méthodes de calcul par éléments finis sont employées pour discrétiser le domaine d'entrée en la divisant en ensemble de petits éléments, typiquement des triangles ou des quadrilatères en deux dimensions ou des tétraèdres en trois dimensions. Une triangulation optimale est définie en mesurant les angles, la longueur des arêtes et la hauteur de l'aire des éléments où l'erreur de l'approximation par éléments finis est normalement reliée à l'angle minimal des éléments [Edelsbrunner, 2001]. Les sommets de la triangulation peuvent être exactement les points d'entrée ou les points supplémentaires, appelés les points de Steiner, qui sont insérés pour créer une maille plus homogène. Le maillage polygonal peut être exécuté en 2D, 2D et demi ou en 3D, selon le type des données d'entrée [Remondino, 2003].

Triangulation 2D. Le domaine d'entrée est l'ensemble de points projetés sur un plan. Des triangles qui se rencontrent sur une arête et sur des sommets partagés sont générés sur le plan et re-projetés dans l'espace. Une des méthodes de reconstruction très connue est la triangulation de Delaunay qui optimise simultanément les critères de qualité mentionnés précédemment. Le critère de Delaunay assure en effet qu'aucun sommet ne se relie à l'intérieur de chacun des cercles circonscrits des triangles dans le réseau (figure 7).

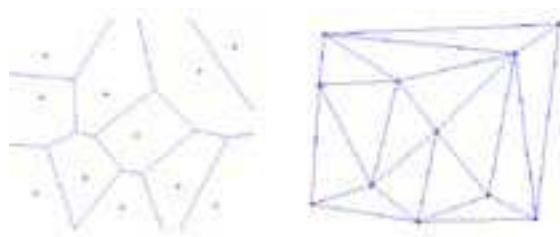


Figure 7. Le diagramme de Voronoi et la triangulation de Delaunay sur le même ensemble de points. Dans Voronoi, chaque région consiste en la partie du plan la plus proche du nœud donnée. La connexion des nœuds des cellules de Voronoi qui ont des bords communs forme les triangles de Delaunay [Remondino, 2003].

Triangulation 2D 1/2. Les données d'entrée sont un ensemble de points dans un plan avec une valeur d'élévation pour chaque point. Ce type de triangulation crée une fonction linéaire interpolant les points définie par l'enveloppe convexe de l'ensemble. Pour chaque point de l'ensemble, la fonction est la moyenne pondérée de l'élévation des sommets du triangle qui le contient. Par rapport à la structure des données (presque régulière ou aléatoirement distribué) la surface produite s'appelle grille d'altitude ou modèle TIN (Triangulated Irregular Network).

Triangulation 3D. La triangulation en trois dimensions est aussi appelée tétraédrisation et consiste en une partition des données d'entrée en une collection de tétraèdres qui se rencontrent seulement aux faces partagées (sommets, arêtes ou triangles). Ce procédé est beaucoup plus compliqué qu'une triangulation 2D. Les types de domaines d'entrée peuvent être des polyèdres simples (sphère), des polyèdres non-simples (tore) ou des nuages de points.

Post-traitement. Les polygones créés ont besoin habituellement de quelques améliorations pour corriger les imperfections ou les erreurs engendrées par les procédures de maillage automatique. Ces opérations (principalement manuelles) se basent sur la manipulation de simples triangles :

- Correction de bords en présence de triangles divisés ou renversés ;
- Insertion de triangles en présence de trous.

Le modèle polygonal peut également être amélioré en ajoutant de nouveaux sommets et/ou en ajustant la position des sommets.

2.2.2.2 Techniques d'instanciation de primitives paramétrables

Si l'objet balayé est composé d'un ensemble de primitives simples (tels que des plans, cylindres, cônes, sphères...) les primitives géométriques correspondantes peuvent être adaptées aux différentes parties du nuage de points. La reconstruction géométrique résultante sera par contre réduite à une représentation plus approximative. Les solutions commerciales disponibles pour le traitement du nuage de points diffèrent considérablement en ce qui concerne les outils qui exploitent cette technique. Certaines offrent une collection d'objets métiers (par exemple les primitives utilisables pour restituer une installation de tuyauteries avec les diamètres standard dans un environnement industriel), instantiables de façon semi-automatique. D'autres solutions peuvent s'appliquer à la reconstruction de structures beaucoup plus compliquées comme des brides, des pompes et des poutres en acier. Si des primitives avec différents niveaux de paramétrage existent aujourd'hui, les logiciels qui les exploitent imposent à l'utilisateur de présélectionner manuellement les parties du nuage de points auxquelles la primitive doit s'adapter. Par contre, la maçonnerie et les éléments architecturaux sont peu susceptibles d'être modélisés et représentés de manière acceptable en utilisant des primitives géométriques simples car ils sont le plus souvent caractérisés par une géométrie complexe. D'ailleurs, comme nous le verrons dans la suite (chapitre 5), dans le domaine du relevé d'architecture, la représentation

graphique doit répondre à des exigences descriptives parfois complexes (chapiteaux, bases, corniches, etc.).

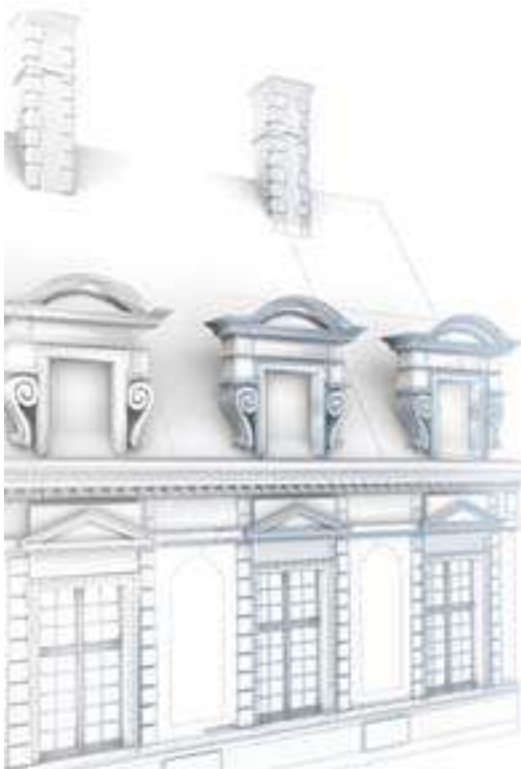


Figure 8. Maquette 3D de la façade sur jardin de l'Hôtel de Sully à Paris. Image: Kyung-Tae Kim, Map-Gamsau 2004

2.2.3 Techniques de reconstruction manuelles à partir d'un ensemble de points pertinents

Les fonctionnalités communes aux logiciels de CAO permettent aujourd'hui de tracer des lignes ou des courbes dans l'espace. À partir des courbes et/ou de simples coordonnées, plusieurs fonctionnalités ont été implémentés dans les logiciels de modélisation géométrique pour générer des surfaces. Certains d'entre eux permettent de manipuler des surfaces NURBS⁵. Nous citons ici un ensemble de fonctions de génération de surfaces qui nous semblent adaptées à la reconstruction d'objets architecturaux. Dans cette classification on tiendra compte principalement des fonctions qui permettent la génération des surfaces s'appuyant sur un ensemble de points d'entrée issu du relevé. Les procédures seront décrites de façon

générale indépendamment du type de génératrice utilisée (polyligne ou courbe) et du type de représentation géométrique résultante (filaire, par frontières ou paramétrique). La figure 8 montre une restitution tridimensionnelle réalisée à partir d'un ensemble de points pertinents et conduite par des procédures de modélisation manuelles.

2.2.3.1 La modélisation filaire

C'est le premier niveau de modélisation dans l'espace. Elle est basée sur des points et des lignes ou des courbes de différents degrés. Les contours de l'objet sont décrits par raccordement des coordonnées d'entrée. En général ces fonctions sont exploitées pour tracer les profils caractéristiques des objets à reconstruire. Ces profils peuvent décrire les frontières d'un objet que aussi bien des génératrices (profils d'extrusion ou de révolution) pour les fonctions de génération des surfaces. Parmi les outils couramment disponibles on peut citer les courbes de Béziérs et les B-splines à forme *ouvertes, fermées ou périodiques*.

2.2.3.2 La modélisation par balayage

Les fonctions appartenant à cette catégorie sont basées sur le déplacement d'une *génératrice* le long d'une *directrice*. On distingue quatre représentations principales de ce type (figure 9) : les surfaces par balayage translationnel, conique, rotationnel, composé.

Balayage translationnel. Cette fonction est à l'origine de l'extrusion. Un objet est défini par balayage translationnel d'une région bidimensionnelle le long d'un vecteur et selon une distance.

Balayage rotationnel. Les objets générés par balayage rotationnel (surfaces de révolution) sont obtenus en faisant tourner une région bidimensionnelle autour d'un axe. La génération de la surface s'appuie sur deux points de pivot (sur la génératrice et sur l'axe) et une fonction radiale.

Balayage conique. Ces balayages à l'origine des formes coniques consistent en un déplacement d'une région bidimensionnelle le long d'un vecteur couplé à un changement d'échelle.

Balayage composé. Ce type de balayage résulte de la combinaison des trois procédures précédentes. Une rotation et un changement d'échelle peuvent être appliqués à la génératrice tout au long de la directrice. La surface résulte de l'extrusion de la génératrice le long de la directrice et d'une interpolation entre l'état de départ et d'arrivée.

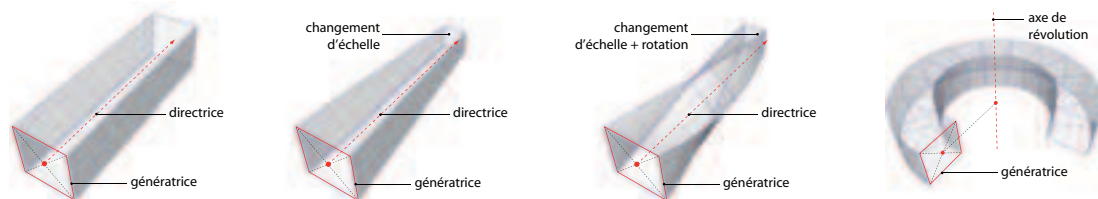


Figure 9. Fonctions de modélisation par balayage. De gauche à droite: le balayage translationnel, conique, composé et rotationnel.

5. NURBS. Non-Uniform Rational B-Splines. Où **Non-Uniform** fait référence au paramétrage de la courbe. Les courbes non uniformes permettent la présence de nœuds multiples, requises pour représenter des courbes de Bézier. **Rational** fait référence à leur représentation mathématique. Cette propriété permet de représenter des coniques exactement (comme courbes paraboliques, cercles et ellipses) en addition aux formes arbitraires. **B-splines** sont des piecewise de courbes polynomiales avec une représentation paramétrique.

2.2.3.3 La modélisation par interpolation

À la différence du balayage, les procédures d'interpolation consistent à générer la surface la plus cohérente entre deux ou plusieurs génératrices (figure 10).

Interpolation de deux frontières. Cette fonction trace une surface entre deux génératrices. Plusieurs options sont disponibles pour le paramétrage de la surface résultante.

Interpolation de quatre frontières. Cette fonction est une généralisation de la précédente. La procédure trace une surface par interpolation bidirectionnelle des paramètres des quatre génératrices connectées aux extrémités.

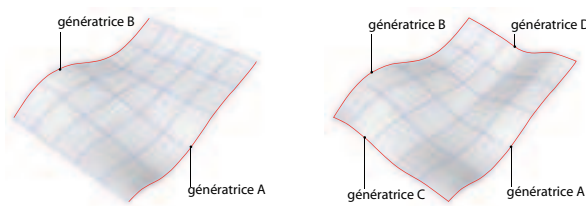


Figure 10. Fonction de modélisation par traçage. À gauche : le traçage à deux frontières, à droite le traçage à quatre frontières.

2.2.4 Techniques de reconstruction basées sur l'image

Une récente convergence de l'*infographie 3D* et de la *vision par ordinateur* a produit un ensemble de techniques, connu sous le nom de *Image-Based Modeling and Rendering*. L'IBMR fait référence à l'utilisation d'images pour conduire la reconstruction tridimensionnelle d'objets. Les approches et les techniques basées sur ce principe peuvent potentiellement éliminer la phase laborieuse normalement requise par la modélisation de structures géométriques détaillées. En effet, un des bénéfices majeur de ces techniques réside dans leurs capacités à restituer de manière fine les effets des textures et les détails liés aux imperfections des objets réels, qui sont très difficiles à obtenir à l'aide des techniques de synthèse d'image conventionnelles [Foley, 2000]. La solution offerte par ces systèmes consiste à remplacer les modèles conventionnels avec des représentations géométriques approximatives enrichies par l'image [Shum et al., 2000]. En fonction de la quantité d'informations géométriques utilisées pour la reconstruction et du nombre d'images nécessaires pour la reconstruction, on distingue les approches basées sur les méthodes projectives et les approches d'approximation non linéaire.

L'aspect de ces systèmes que nous jugeons extrêmement intéressant concerne principalement leur ergonomie, c'est-à-dire la possibilité de conduire l'opération de reconstruction géométrique directement sur les images. La photographie est en effet un support bien adapté à l'interprétation des formes.

2.2.4.1 Approches basées sur les méthodes projectives

Ces systèmes basent la procédure de reconstruction 3D à partir d'un bloc d'images non calibrées et en trois phases distinctes : dans une première phase, on établit les correspondances entre différentes prises de vue ou entre des photogrammes d'une séquence vidéo (possibilité d'utiliser la continuité temporelle pour simplifier les calculs). Ces correspondances peuvent être des points (ImageModeler⁶, Photomodeler⁷) ou des lignes présumées perpendiculaires ou

6. **Image Modeler.** <http://www.realviz.com>

7. **Photomodeler.** <http://www.photomodeler.com>

parallèles [Cipolla et al., 1999] sélectionnées sur les images. Certains systèmes utilisent des techniques éprouvées de vision par ordinateur afin d'automatiser le plus possible cette tâche [Faugeras, 1993]. De là, les matrices de projection des images peuvent être calculées à une transformation projective près grâce aux propriétés de la géométrie épipolaire. Ces procédés permettent de déterminer les paramètres externes (position et orientation) et dans certains cas aussi internes (distance focale et distorsion) des appareils photo, comme on l'a déjà décrit dans la section (restitution à partir d'un bloc d'images). Pour fournir des résultats plus précis, certains systèmes, au-delà d'un ensemble de correspondances d'éléments sur le bloc d'images, requièrent aussi l'introduction des paramètres intrinsèques de la chambre. La deuxième phase consiste en une véritable reconstruction des éléments de la scène en utilisant des primitives géométriques et des fonctions de déformation. Une solution commerciale exploite les propriétés des représentations par frontières (Brep) : les transformations simples (translation, rotation, changement d'échelle) peuvent alors être affectées à la primitive entière aussi bien qu'à une ou plusieurs de ses composantes (faces, arêtes, sommets). La troisième phase consiste en l'extraction des textures à partir des photographies, tout en exploitant l'alignement entre les centres optiques des caméras calibrées, les polyèdres modélisés dans l'espace et les plans d'images (photographies) ; cette opération permet d'extraire des portions d'images qui sont plaquées sur les modèles selon la modalité de projection déduite à partir d'une ou plusieurs

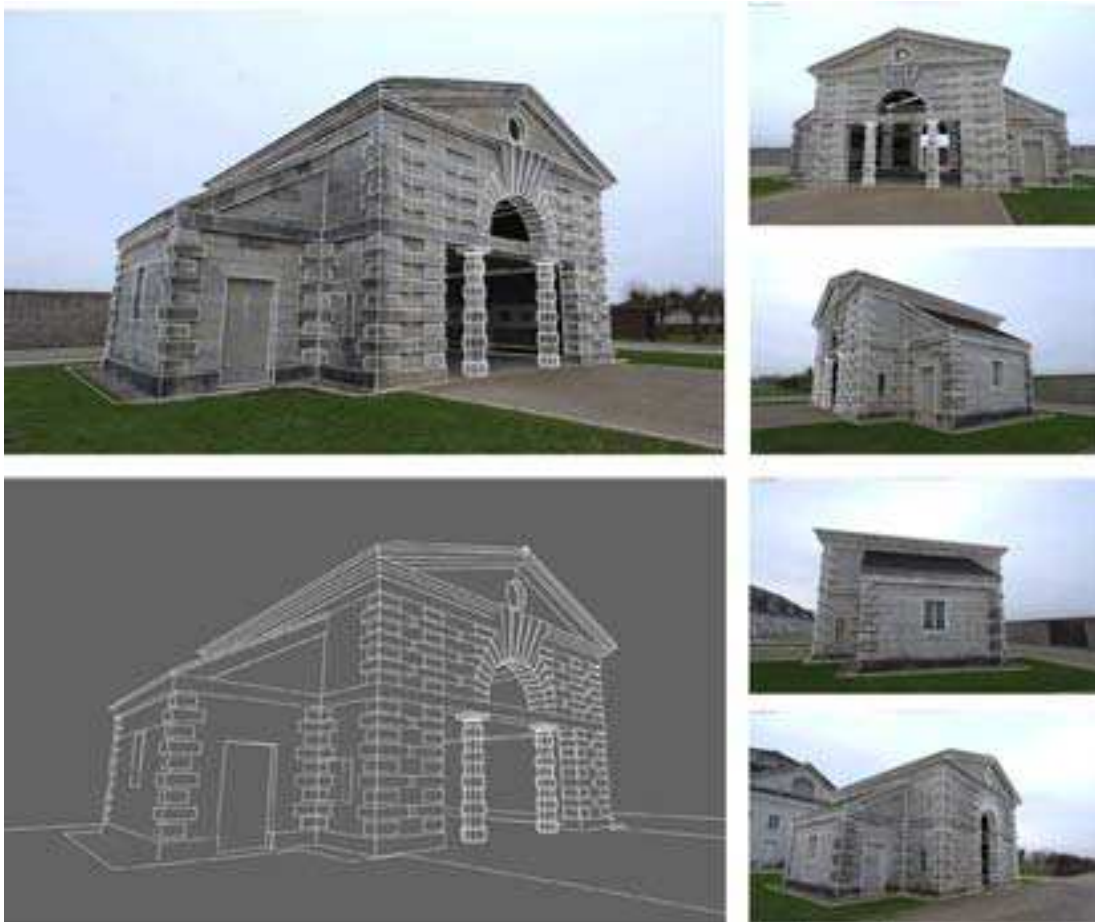


Figure 11. Photo-modélisation des Écuries du directeur, Saline Royal d'Arc et Senans. À droite des images du bloc utilisé pour la calibration des caméras. À gauche, la restitution tridimensionnelle de l'objet. Image : Francesca De Domenico, Map-Gamsau 2002.

caméras. Cet aspect sera approfondi dans la section suivante qui traitera la restitution de l'apparence visuelle. À titre d'exemple la figure 11 montre la restitution tridimensionnelle d'un édifice obtenue par une démarche de photo-modélisation.

2.2.4.2 Approches d'optimisation non linéaire

La reconstruction des formes à partir d'une seule image est un problème complexe ; par conséquent la plupart des recherches dans ce domaine se sont concentrées sur le problème, plus réduit, de la reconstruction de modèles architecturaux approximatifs [Debevec et al., 1996] [Liebowitz et al., 1999], pour lesquels l'abondance de surfaces planes, de lignes parallèles et perpendiculaires peut être exploitée pour rendre la reconstruction plus simple.

Le système *Façade* [Debevec et al., 1996] [Taylor et al., 1996] utilise un algorithme d'optimisation non linéaire pour reconstruire des modèles 3D texturés d'éléments architecturaux à partir d'une seule ou plusieurs photographies. L'optimisation consiste à minimiser la somme de disparités entre les arêtes de primitives avec des invariants géométriques connus (parallélisme, perpendicularité, etc.) et leur projection sur l'image. Ce processus est assuré par l'ajustement simultanée des paramètres du modèle, de la position et de l'orientation de la caméra. Pour améliorer la convergence, le système utilise une procédure d'initialisation basée sur deux étapes. La première estime la rotation de la caméra, tandis que la seconde estime la translation de la caméra et les paramètres (proportions) de la primitive. Comme pour les autres solutions, des parties d'image extraites à partir des photographies originales sont utilisées pour texturer le modèle final. La version étendue de *Façade* ajoute à l'ensemble de primitives originales, des primitives d'arc et de surfaces de révolution [Borshukov, 1997]. Inspirés par *Façade* [Werner et al., 2002], proposent une approche entièrement automatisée. Au lieu des primitives de base, les principaux plans de la scène sont créés automatiquement pour assembler un modèle brut qui guide un modèle plus raffiné des détails tels que des fenêtres, des portes, et des blocs de cale. Puisque c'est une approche entièrement automatisée, cela fonctionne mieux avec des images étroitement espacées pour assurer une correspondance correcte.

2.3 La restitution de l'apparence visuelle

Plusieurs techniques de synthèse d'images sont disponibles aujourd'hui pour simuler l'apparence visuelle des formes basées sur le calcul de l'interaction entre sources lumineuses, caractéristiques des matériaux et géométrie des objets. Par contre, même si ces techniques de synthèse nous permettent parfois de produire des images photo-réalistes, elles ne s'appuient sur aucune donnée d'entrée valable. Le but de la restitution de l'apparence visuelle dans un contexte de reconstruction qui se sert d'une numérisation de l'existant est de restituer les véritables caractères qui décrivent l'aspect des surfaces en cohérence avec la géométrie de l'objet. Par conséquent, nous allons nous concentrer sur l'aspect réduit de l'extraction et de la restitution d'informations photométriques. Ces informations peuvent en effet jouer un véritable rôle dans la documentation de l'état de conservation d'un édifice.

2.3.1 L'acquisition d'informations photométriques

Dans la plupart des systèmes de restitution photogrammétrique, la mise en cohérence entre une photographie, un support pour la description des objets et l'extraction précise d'information photométrique est un problème complètement exploré. Reste encore le problème que la restitution photogrammétrique mono et stéréo s'appuie sur des plans bidimensionnels. Cette limitation est incompatible avec l'extraction complète de toutes les faces qui composent les différents éléments que l'on veut reconstruire.

Par rapport à l'élaboration de mosaïques d'images rectifiées, le processus d'extraction de textures pour les objets 3D est beaucoup plus compliqué. En généralisant, on pourrait dire que chaque petit élément extérieur devrait être acquis photographiquement de façon indépendante (par rapport à l'angle d'incidence) [Visnovcova et al., 2000]. Sans compter que les variations des conditions d'éclairage pendant l'acquisition peuvent changer même radicalement.

Nous avons vu que certains modules de balayage laser, peuvent restituer un attribut représentant la force du signal retourné (luminance) en addition aux coordonnées des points acquis. Si elle est normalisée, cette valeur peut être employée pour créer une image (en niveaux de gris) des tonalités de l'objet. En ce qui concerne les scanners qui incorporent une camera DTC pour fournir une information colorimétrique, une réflexion s'impose. Dans le module basé sur le principe de la triangulation, cette information est en parfaite cohérence avec l'acquisition métrique. En effet, la matrice DTC de la caméra incorporée contient le même nombre de points que le dispositif peut acquérir métriquement. Ceci est possible grâce aux limitations de portée qui caractérise ce type d'instrument (de 0,1 à 2m). Par contre, dans les dispositifs de balayage longue portée, la matrice d'acquisition des valeurs RVB (généralement une caméra embarquée à faible résolution : 765x576 pixels) est clairement moins définie de celle du dispositif de balayage laser. Ceci conditionne fortement les résultats de superposition de l'image sur le nuage de points. Une solution peut être l'acquisition d'images à haute résolution avec un appareil photo séparé. Dans ce cas, la position de l'appareil photo au moment de la prise de vue ainsi que son orientation devra être enregistrée pour permettre la projection des valeurs colorimétriques acquises sur le nuage de points. Dans tous les cas, jusqu'à présent, le problème de l'uniformité de l'éclairage de la scène reste encore irrésolu.

2.3.2 L'extraction et le plaquage des textures

En infographie une texture est définie comme une microstructure de la surface à représenter [Heckbert, 1986]. Il existe différentes techniques de génération synthétique des textures. Comme on l'a déjà dit, nous allons traiter exclusivement celles qui s'appuient sur l'extraction et le plaquage de portions d'images directement à partir des photographies.

Extraire une texture à partir d'une image consiste à isoler les parties de l'image correspondant aux entités présentes dans la scène 3D ou à une région sélectionnée selon des modalités de projection. [Catmull, 1975] a montré que des photographies peuvent être appliquées sur une surface libre. Cependant cette technique ne fonctionne pas bien quand le nombre de points de la surface à afficher est inférieur au nombre d'éléments (pixels) dans l'image. L'auteur suggère alors de faire des correspondances région par région plutôt que point par point, en subdivisant simultanément la surface et l'image. En fait, le plaquage revient à une transformation entre deux systèmes de coordonnées : l'espace de la texture et l'espace tridimensionnel classique⁸. Un cas commun est l'application d'images polygonales bidimensionnelles sur des surfaces polygonales 3D définies avec des faces quadrangulaires. La technique revient à découper l'image plane selon une grille puis à faire correspondre à chaque case son équivalent sur la surface. On peut alors transformer la partie d'image contenue dans la case plane selon la forme du polygone équivalent. Or, suivant la méthode de reconstruction utilisée, le système dispose ou non des contours du modèle projeté dans l'image. Ces contours peuvent donc être déterminés par la projection du modèle selon deux modalités différentes :

8. Si les deux espaces sont exprimés en coordonnées paramétriques, on peut définir la fonction de correspondance: espace de texture : (t, u) espace 3D : (v, w) . $v = F(t, u)$ et $w = G(t, u)$ ou $t = H(v, w)$ et $u = I(v, w)$.

Projection plane. C'est le cas de l'extraction et du plaquage des textures à partir d'images redressées. On re-projette le modèle sur l'image selon les orientations du plan de rectification et on établit les relations dimensionnelles entre la mosaïque d'images et le modèle 3D. Dans ce cas là, l'image n'est pas déformée et est plaquée en fonction de la normale du plan.

Projection perspective. C'est le cas de la restitution à partir d'un bloc d'images. On projette le modèle 3D sur le plan d'image d'une caméra et on isole une portion de la photographie associée. Ensuite, ces textures doivent être redressées, de manière à éliminer les déformations dues à la perspective de la projection initiale. Cette opération peut être effectuée par un algorithme de parcours ligne par ligne. On peut aussi extraire directement le rectangle qui borne la surface à traiter et sauver les positions relatives des points de la surface dans ce rectangle (les 4 points du rectangle sont obtenus grâce aux minima et maxima des coordonnées des points de la surface). La figure 12 montre un résultat obtenu par l'utilisation complémentaire des deux types de



Figure 12. L'extraction et le plaquage des textures sur la maquette 3D de la cour du midi du chateau Comtal à Carcassonne. À gauche le modèle 3D polygonal. À droite la maquette texturée. Image : Chawee Bussarayay, 2005

projection.

Dans le cas où l'on aurait travaillé avec plusieurs photographies, il est naturel de penser que chaque surface du modèle a au moins une texture lui correspondant. S'il y en a plusieurs pour une même surface, il faut choisir laquelle utiliser ou combiner celles-ci. Deux méthodes peuvent alors être employées [Huot, 2000] :

Le texturage indépendant du point de vue. Dans ce cas, la texture plaquée sur la surface reste toujours la même. Elle peut être extraite de l'une des photographies ou d'une combinaison de celles-ci. Ces méthodes donnent des résultats satisfaisants, mais peuvent provoquer des artefacts visuels gênants comme des déformations perspectives trop marquées ou des éclairages non conformes.

Le texturage dépendant du point de vue, ou dynamique, permet au contraire de choisir en temps réel la texture à afficher en fonction de la position d'observation. La texture choisie par le système est alors celle dont le point de prise photographique original est le plus proche du point d'observation. [Genc et al., 1999] utilise cette méthode. Pour chaque texture de chaque surface, il garde le point de vue original. [Devebec et al., 1996] utilise une méthode similaire à l'exception qu'il ne décompose pas son modèle en surfaces. Pour chaque pixel, au moment du rendu, la couleur est déterminée par celle qu'il a dans l'image la plus proche de ce point

de vue.

Finalement, l'utilisation des photographies pour visualiser les modèles reconstruits permet d'atteindre un réalisme difficile à obtenir avec les techniques de rendu classiques ou au prix de temps de calcul énormes. Ceci permet une bonne appréciation de l'apparence visuelle des objets. C'est aussi la prérogative (et la limitation en même temps) des méthodes de rendu à partir d'images (*Image-Based Rendering*) qui ne nécessitent pas forcément la reconstruction du modèle 3D.

2.3.3 Le rendu basé sur l'image

L'Image-based Rendering (IBR) utilise les images, à la place des polygones, comme primitives de modélisation et de rendu. En pratique, plusieurs approches correspondent à des hybrides image-géométrie, avec la quantité correspondante de géométrie comprise entre la profondeur par pixel et des centaines de polygones [Oliveira, 2002]. Parmi la gamme de techniques disponibles pour le rendu basé sur l'image, nous allons ici décrire juste celles qui nous semblent applicables aux problèmes de représentation d'objets patrimoniaux.

2.3.3.1 Techniques hybrides de rendu basé sur l'image

Les techniques hybrides de rendu basé sur l'image utilisent une quantité d'informations géométriques, en addition aux images, pour synthétiser des nouvelles vues des scènes.

Les images-distance (ou les images avec profondeur) [McMillan, 1997] sont utilisées par une grande famille de techniques d'IBR qui rassemble les *layered depth images* (images de profondeur multicouches), les *image-based objects* (objets basés sur l'image), et le *relief texture mapping* (plaquage des textures en relief). Une image avec distance est une paire $\{i_d, K\}$, où i_d est une image numérique et K est un modèle de caméra associé à i_d . Chaque élément de l'espace de i_d est augmenté par une valeur scalaire par pixel représentant la distance, dans l'espace Euclidien, entre le point et l'entité de référence. Si K est un modèle de caméra à projection perspective, l'image est appelée *perspective projection image with depth* et l'entité de référence est le centre de projection de K . Quand K est un modèle de caméra à projection parallèle, l'image est appelée *parallel-projection image with depth* et l'entité de référence est le plan d'image de K . Dans une image avec profondeur le contenu de la scène est représenté de façon implicite en combinant les informations de profondeur par pixel avec le modèle de caméra associé à l'image.

Images de profondeur multicouches. Une image de profondeur multicouches (Layered Depth Image) [Shade et al., 1998] est une image avec une profondeur qui supporte plusieurs échantillonnages (couleur et information de profondeur) par rayon d'échantillons. Dans ce cas, chaque élément de l'image consiste en une liste ordonnée d'échantillons. Ce type d'image peut être déformé en utilisant une équation (3-D image-warping équation [McMillan, 97]). Dans ce cas, dès qu'un pixel est prêt pour la déformation, tous les échantillons au long du rayon correspondant peuvent être déformés.

Objets basés sur l'image (Image-based objects). Comme les images avec profondeur et les images de profondeur multicouches, les objets basés sur l'image [Oliveira et al., 1999] peuvent être déformés en produisant une re-projection correcte des surfaces représentées. L'échantillon de la surface entière d'un objet 3D requiert par contre d'imaginer ce processus à partir de différents points de vue. Les *Images-Based Objects* (IBOs) réalisent une représentation basée sur l'image pour des objets 3D qui peuvent être rendus dans un ordre



Figure 13. Le processus de construction d'une texture avec relief. À gauche : la surface correspondante est projetée de façon orthogonale dans un plan de référence et la profondeur est mesurée comme la distance par pixel du plan au point échantillonné. À droite : les composantes couleur et profondeur correspondantes de la texture relief résultante. Dans [Oliveira et al., 2000].

compatible avec les occlusions. Un IBO est construit en extrayant de multiples vues de l'objet, en les consolidant et en le re-échantillonnant à partir d'un unique centre de projection sur les faces d'un parallélépipède. En généralisant, chaque IBO est représenté par six images avec profondeur multicouche. L'utilisation d'un parallélépipède permet qu'une représentation puisse être décomposée en régions planes paramétrées (faces du parallélépipède) pour lesquels la déformation peut être facilement implémentée.

Textures-reliefs. Les textures reliefs sont une extension du plaquage de textures conventionnel qui permet la représentation des détails de la surface 3D [Oliveira et al., 2000]. Cet effet est obtenu en pré-déformant les textures avec reliefs et en plaquant les images résultantes sur des polygones plans. Les textures-reliefs sont des textures étendues avec un modèle de caméra à projection parallèle. La figure 13 illustre le processus de construction d'une texture avec relief.

2.3.3.2 Techniques pures de rendu basé sur l'image

Les techniques pures de rendu basé sur l'image utilisent comme source de reconstruction exclusivement des images des scènes pour rendre des nouveaux points de vue. Des échantillons d'environnement sont capturés comme ensemble de photographies (ou séquences vidéo) et sont ré-échantillonnées en phase de rendu. Dans ce cas, la modélisation 3D n'est pas requise et la vitesse de rendu n'est pas affectée par la complexité de la scène.

Les panoramas cylindriques (ou cartes d'environnement cylindriques) sont utilisés pour générer une indépendance de l'orientation horizontale dans l'exploration d'une scène à partir d'un point unique. Le choix du panorama cylindrique est justifié par la facilité d'obtenir des images (prises de vue multiples en rotation autour de l'axe vertical de l'objectif) et par le fait qu'une carte cylindrique tourne dans une seule direction. Les panoramas cylindriques peuvent être créés en utilisant de caméras spécifiques⁹, en reliant entre elles des photographies acquises avec un appareil standard ou en calculant des rendus d'images. QuickTime VR¹⁰, qui supporte le rendu pour les panoramas cylindriques, a été le premier produit commercial à utiliser la technologie basée sur l'image [Chen, 1995]. Après QuickTime VR, plusieurs visualisateurs

pour le rendu à partir d'images cylindriques ont été développés. Ces visualisateurs supportent les déplacements continus en direction horizontale et le zoom. Le déplacement sur la verticale est limité par le champ vertical du point de vue du panorama cylindrique. Pendant le déplacement, la portion visible de l'image cylindrique est déformée pour produire des images à perspective plane correcte. Le déplacement est implémenté dans un processus à deux étapes : premièrement, la portion visible du panorama est plaquée sur un plan parallèle à l'axe du cylindre en utilisant une technique de déformation¹¹, deuxièmement, l'image résultante est plaquée sur le plan d'image désiré en utilisant une transformation projective plane. Le zoom est obtenu en changeant le champ de vue de la pyramide visuelle. Dans le but d'obtenir plus de détails quand on zoom en avant et en perdre en reculant, une image à structure pyramidale peut être utilisée pour l'interpolation entre les différents niveaux de résolution.

À partir de ce principe plusieurs solutions ont été développées pour permettre une exploration complète de la scène acquise (360° dans toutes les directions). Ces solutions utilisent une déformation d'images équirectangulaires (carte d'environnement sphérique) ou un assemblage de six caméras avec un angle de 90 degrés (carte d'environnement cubique). La limitation majeure des systèmes basés sur les cartes d'environnement (cylindriques, sphériques ou cubiques) est de contraindre l'exploration à une position unique (le point de vue à partir duquel les images ont été acquises). En tout cas, ces techniques restent une solution efficace pour la restitution d'un contexte environnemental.

2.4 Conclusions

Dans ce chapitre une description des principales procédures pour acquérir des données spatiales, les convertir en représentations géométriques puis les enrichir avec des informations photométriques a été présentée (figure 14). En essayant d'inscrire les outils et les techniques que l'on a décrites dans notre cadre spécifique on peut tirer un certain nombre de conclusions.

Par rapport à la phase d'acquisition, on a vu d'un côté que le scanner laser 3D peut devenir un outil de référence pour l'acquisition exhaustive de la morphologie d'objets architecturaux. De l'autre côté les configuration d'acquisition et restitution photogrammétrique multiples permettent leur application à un nombre très élevé de cas. Nous avons ensuite évalué les deux systèmes d'acquisition en fonction de trois critères pertinent pour leur adaptabilité au relevé d'architecture. En effet, si le laser peut reproduire rapidement une grande quantité de données, la résolution de ces données peut être insuffisante, surtout si les arêtes et les surfaces linéaires doivent être acquises. Au contraire, la photogrammétrie numérique est plus précise dans la restitution des contours, spécialement si les discontinuités sont clairement distinguées dans la réalité. Mais, cela reste un travail très long et difficile, quand un nombre considérable de points est nécessaire pour décrire la morphologie de l'édifice.

En ce qui concerne la phase de reconstruction 3D, les procédures automatiques permettent certainement une génération des surfaces plus rapide, mais elles présentent aussi

9. **Globuscope Panoramic Canera.** <http://www.everent.com/globus> (juillet 2003).

10. **QuickTimeVR.** <http://www.apple.com>

11. La déformation peut être implémentée en utilisant une formulation inverse, similaire à celle utilisée pour le plaquage des textures [Heckbert, 1998]. Donnée la coordonnée (x,y) d'un point dans le plan d'image, on peut obtenir directement les paramètres correspondants (u,v) dans la carte d'environnement cylindrique.

des limitations qui se répercutent sur la qualité finale du modèle 3D. De fortes limitations de ces modèles concernent aussi leur exploitation effective pour la production de représentations. En ce qui concerne la reconstruction manuelle à partir d'un ensemble de points pertinents, il est évident que cette solution reste, malgré les temps requis, la plus convenable quand l'objectif est de restituer un objet complexe tel qu'un édifice du patrimoine.

Dans ce cas, les outils pour la génération de surfaces à partir des profils extraits sont

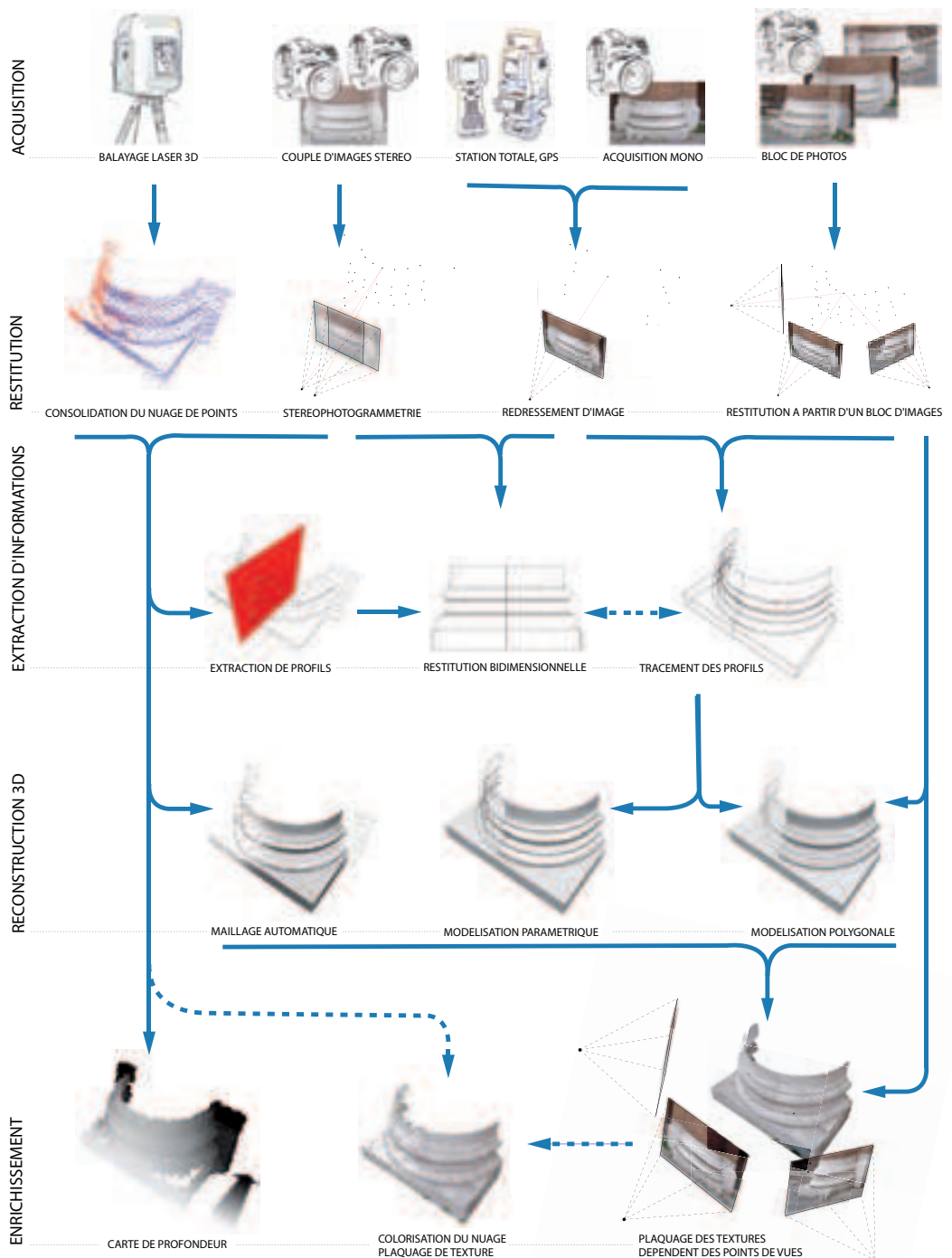


Figure 14. Synthèse des procédures pour l'acquisition, le traitement et le rendu de données spatiales.

évidemment les plus appropriés à l'interprétation des données provenant d'une acquisition photogrammétrique mono, stéréo, ou multi-vue. De plus, l'introduction de l'image comme support pour conduire les opérations de reconstruction dans les nouveaux systèmes de photo-modélisation, constitue un cadre très prometteur. En revanche, La restitution photogrammétrique, comme la modélisation basée sur l'image, restent des techniques inadaptée à la reconstruction des formes caractérisées par une géométrie qui ne présente pas de discontinuités visibles (décors sculptés).

Enfin, sur les aspects concernant la restitution de l'apparence visuelle des surfaces, les techniques de rendu basé sur l'image, qui n'ont pas besoin d'un modèle géométrique sous jacent, peuvent suffire à la simple exploration de la scène tridimensionnelle mais le manque d'information métrique est incompatible avec les exigences de la documentation du patrimoine. Au contraire, l'extraction et la restitution d'informations photométriques en cohérence avec la description détaillée de la morphologie de l'objet semble une voie prometteuse pour l'enrichissement des maquettes numériques.

3. Une approche hybride pour la restitution tridimensionnelle du patrimoine bâti

3.1 Problématique

Avec la disponibilité de nouveaux outils comme les capteurs laser et un assortiment croissant de techniques basées sur l'image, et le développement continu d'outils de modélisation géométrique, il est important maintenant de comprendre comment ces outils, et les techniques qui les exploitent, peuvent être intégrés en approches de restitution tridimensionnelle d'édifices. Comme on le verra dans ce chapitre, à l'exception du cas rare d'un relevé d'un objet de petite taille, l'application d'une seule technique est inefficace, impraticable, ou insatisfaisante pour répondre aux exigences que la documentation d'un édifice requiert. De plus, la complexité morphologique qui caractérise les bâtiments du patrimoine, ainsi que les différents objectifs d'analyses exigent des processus d'acquisition et de traitement qui répondent à différents aspects à la fois. Dans ce chapitre, nous faisons d'abord un état de l'art des approches pour la restitution tridimensionnelle d'édifice. Ensuite, nous proposons une approche hybride pour le relevé, la restitution tridimensionnelle et la multi-représentations. Les trois parties principales concernant les étapes identifiées dans l'approche seront traitées dans les trois chapitres suivants. Ce chapitre se termine avec la présentation de l'environnement de développement utilisé pour la validation des procédures techniques conçues.

3.2 Approches actuelles pour le relevé et la représentation d'édifices

Durant la génération de la maquette 3D d'un édifice, les besoins d'une précision géométrique détaillée, la disponibilité de tous les détails, les performances d'affichage en temps réel et le photoréalisme sont aujourd'hui des aspects fondamentaux. La plupart des projets de documentation d'objets culturels emploient une méthode ou une autre, tandis que seulement un petit nombre d'expériences utilisent une combinaison de techniques. [Bernardini et al. 2002] combinent par exemple la lumière structurée et la stéréophotogrammétrie pour modéliser la « Pietà » de Michelangelo. [Sequeira et al., 2001] utilisent le balayage laser avec la modélisation et le rendu basé sur l'image. Mais, au delà de la simple application d'un procédé technique, qu'il soit simple ou intégré, d'autres dimensions d'ordre méthodologique s'imposent pour la détermination d'une stratégie d'acquisition et de traitement des données spatiales. Pour bien évaluer la validité d'une approche, il est nécessaire d'identifier les objectifs de représentation qui conduisent les différentes expériences. Le propos de cette partie de l'état de l'art est de tenter une classification des approches actuelles de reconstruction 3D d'édifices patrimoniaux en fonction des exigences de description qui les déterminent et en présentant de façon transversale les procédés techniques mis en place pour leur développement. En effet, le choix d'un type de représentation véhicule les modalités de collecte de données et détermine leur traitement.

Dans cette optique, nous avons regroupé un certain nombre d'expériences en quatre

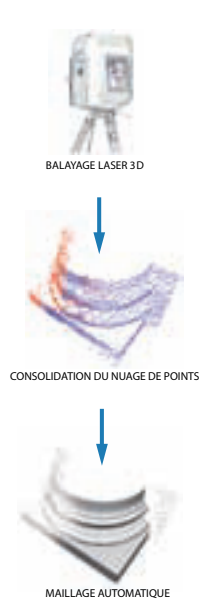
catégories d'approches principales :

- Celles qui visent à l'exactitude géométrique du modèle 3D ;
- Celles qui sont basées sur des exigences de description spécifiques à un type d'analyse ;
- Celles qui se concentrent sur la restitution de l'apparence visuelle ;
- Celles qui focalisent sur la représentation de plusieurs aspects à la fois.

À chaque expérience citée, nous associons un schéma montrant la chaîne de traitement mise en place par les auteurs, plus des illustrations des résultats obtenus par les auteurs.

3.2.1 Approches visant à l'exactitude du modèle géométrique

Ces approches s'appuient sur l'application d'une démarche standard de reconstruction 3D à partir d'un balayage laser 3D. Dans les expériences que nous allons citer, une attention particulière est donnée à l'évaluation de l'exactitude géométrique du modèle résultant de la phase de reconstruction. Toutes (ou presque) les informations acquises en phase de relevé sont exploitées pour la génération d'un modèle polyédrique décrivant les surfaces de façon la plus cohérente possible aux points saisis.



[Fangi et al., 2001] décrivent une expérience de relevé menée sur le temple néoclassique à l'intérieur de la « Mole Vanvitelliana » à Ancône en Italie. Les auteurs utilisent une acquisition laser temps de vol pour évaluer les résultats que l'on peut obtenir en matière de reconstruction de surfaces par maillage automatique. Dans ce but, ils comparent différentes solutions commerciales pour le traitement des nuages de points résultant d'une acquisition laser 3D. Le nuage de points, obtenu par un scanner laser temps de vol, résulte de la consolidation de 8 stations autour du petit temple pour un total de 2.500.000 points. Une première voie explorée, qui n'a pas donné de résultats satisfaisants, a consisté à évaluer l'application de procédures d'instanciation de primitives géométriques. Des parties homogènes et régulières du nuage de points sont sélectionnées pour instancier automatiquement des primitives géométriques simples (plans, cylindres, sphères et cônes). Compte tenu des résultats trop approximatifs obtenus par cette méthode, les auteurs ont ainsi procédé à l'évaluation des procédures de maillage automatique. Après une analyse comparative des résultats obtenus par différents logiciels, les auteurs posent les problèmes communs à toutes les solutions commerciales employées. Une première remarque concerne la quantité des données à traiter. Les algorithmes testés ont de grosses difficultés pour le calcul de l'ensemble des surfaces décrivant l'objet entier. Un autre problème concerne la qualité des surfaces résultantes. Les artefacts présents sur la géométrie restituée (présence de trous, discontinuités, etc.) dépendent principalement de divers facteurs accidentels qui influencent la propagation du faisceau laser en phase d'acquisition. De plus, le faisceau laser au moment de l'impact avec la surface est réfléchi dans différentes directions qui dépendent de la rugosité superficielle locale : cela altère de façon considérable la qualité du maillage généré. Enfin le type de matériau impacté par le faisceau détermine l'intensité du signal de retour. Cela conduit parfois à une perte de données et une dégradation conséquente du nuage de points quand il n'y a pas de retour du signal (white noise).

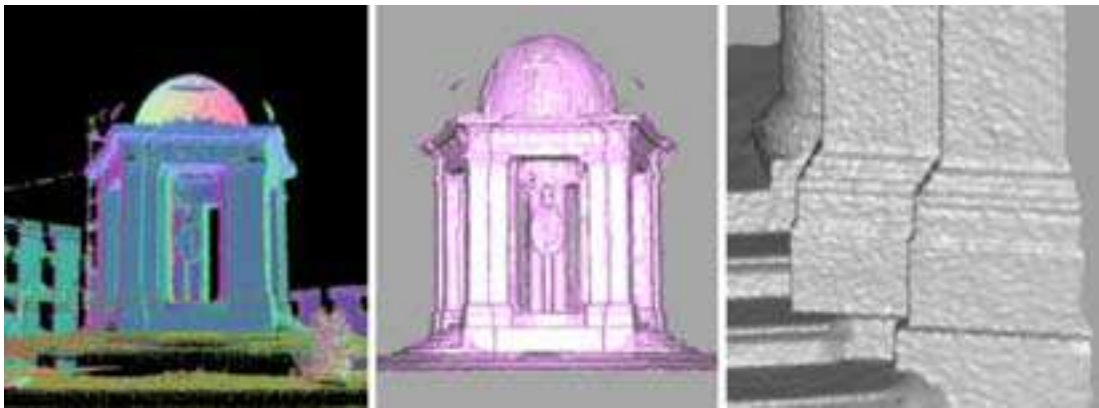


Figure 15. Temple néoclassique à l'intérieur de la « Mole Vanvitelliana », Ancône, Italie. De gauche à droite : nuage de points résultant de la phase de relevé; modèle polyédrique généré par maillage automatique. Détail de la surface obtenue. Dans [Fangi et al., 2001].



En utilisant différentes procédures de maillage automatique et dans le but de restituer la variété des surfaces que le bâtiment présente, [Malinverni et al., 2003] produisent des représentations par maillage polyédrique à différents niveaux de résolution. La stratégie adoptée vise à décrire les différents niveaux de détail que l'objet étudié exprime dans sa composition. Les triangles de la surface maillée peuvent en effet être simplifiés en présence de surfaces planes qui ne présentent beaucoup de détails. Au contraire un maillage dense permet de décrire de façon plus adéquate les parties constituées de décors en relief. Les auteurs indiquent deux voies complémentaires pour la simplification des surfaces. La première s'appuie sur le filtrage du nuage de points avant le maillage automatique. Plusieurs critères d'échantillonnage sont cités avec une attention particulière pour le filtrage spatial. Une enveloppe cubique définissant par ses dimensions l'unité de la maille de référence est superposée au nuage : un seul point est gardé à l'intérieur de l'enveloppe après l'application du filtre. La seconde utilise des procédures de décimation polyédrique sur les surfaces maillées. La structuration de la maquette en plusieurs niveaux de résolution constitue pour les auteurs une voie pour la conservation et le

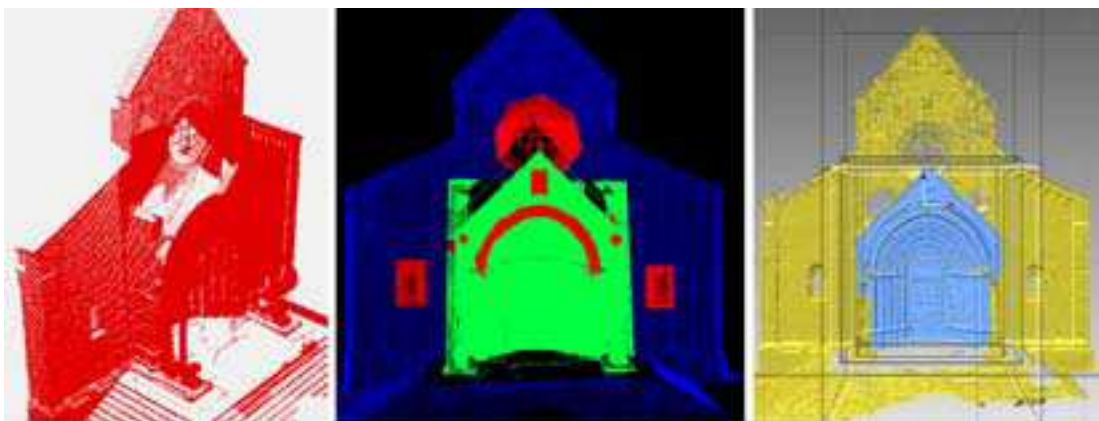
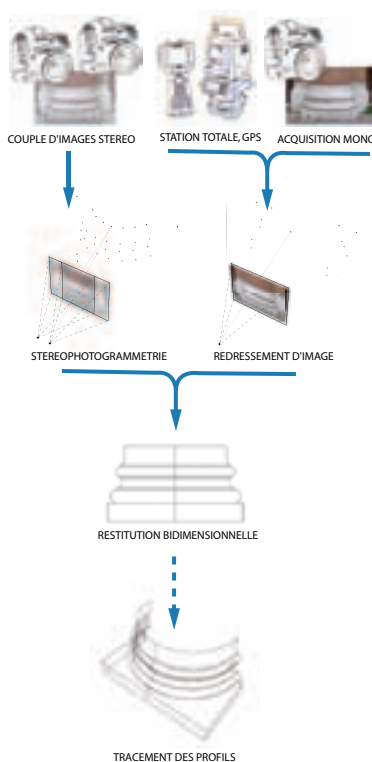


Figure 16. La Cathédrale de Ancône, Italie. Le nuage de points résultant de la phase de relevé (gauche). Échantillonnage à plusieurs niveaux de résolution de l'ensemble des données acquises (centre). Le maillage automatique appliqué aux différentes parties échantillonnées. Dans [Malinverni et al., 2003].

partage de la restitution géométrique d'un édifice. Les raisons techniques qui conduisent ce traitement sont en effet contraintes à l'exploitation des modèles 3D générés dans des systèmes de navigation temps réel en ligne.

3.2.2 Approches se basant sur des exigences de description

Ce genre d'approches est caractérisé par une stratégie d'acquisition et de traitement conçues en cohérence avec un objectif de représentation. En général il s'agit d'acquérir un ensemble de points pertinents pour restituer les seules informations nécessaires à la description d'un aspect spécifique (restitution des caractères constructifs, analyse de la forme architecturale, lecture de l'état de conservation des matériaux, etc.).



[Lingua et al., 2003] décrivent une approche standard de relevé en considérant deux buts principaux : construire un modèle 3D et extraire des représentations canoniques pour la compréhension de l'édifice et pour la planification d'une procédure de restauration correcte. Le relevé est composé de deux phases. La première concerne l'échelle urbaine et utilise le redressement de photographies pour restituer les façades des édifices adjacents à la « Confraternita della Misericordia ». La deuxième, à l'échelle de l'édifice, utilise une acquisition stéréophotogrammétrique. Le relevé est réalisé en deux phases : la création du modèle photogrammétrique (acquisition des points d'appui, orientation des images) et la restitution graphique conduite par interprétation des entités enregistrés dans les couples d'images stéréo. Dans cette phase, la variété d'éléments à représenter requiert une sélection continue des données basée sur des connaissances spécifiques. La restitution se base sur l'assemblage des différents plans 2D extraits de l'espace 3D. Un aspect intéressant de la restitution élaborée par les auteurs concerne l'assignation d'une épaisseur spécifique aux éléments de la représentation filaire choisie en fonction des différents aspects analysés : lignes de section, éléments principaux, dégradations, fissures, trous, décorations, etc.

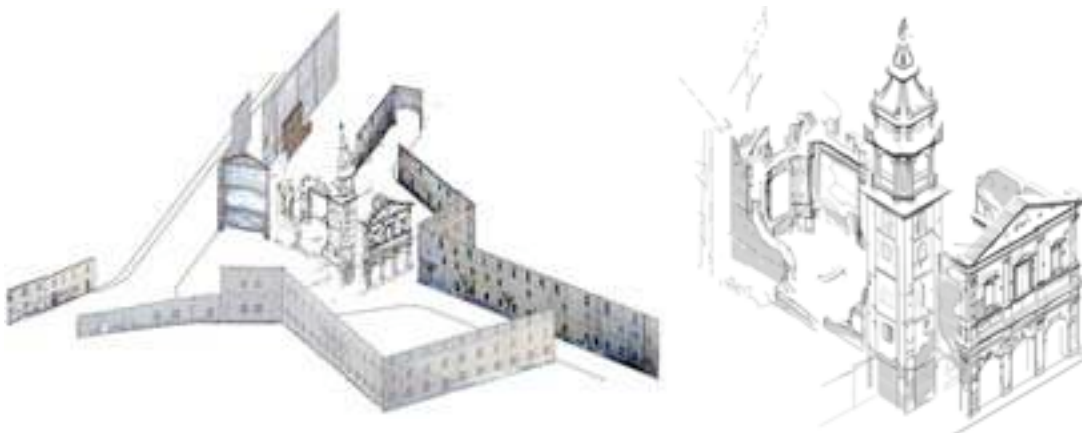
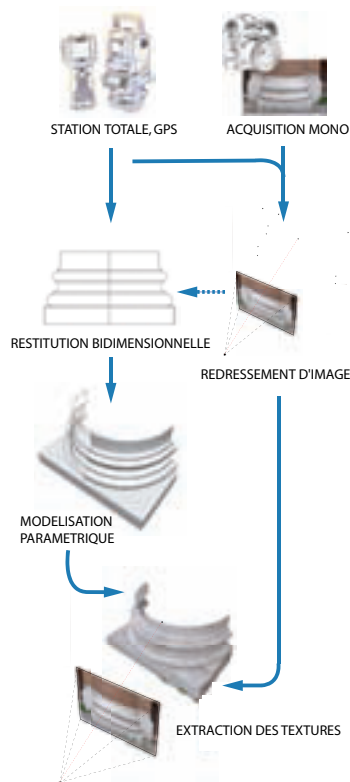


Figure 17. Modèle 3D de la « Confraternita della Misericordia » à Savignano, Italie. Élaboration produite par assemblage des résultats de restitution graphique et de rectification de photos. Dans [Lingua et al. 2003].



L'expérience décrite dans [Bonora et al., 2003], menée autour de la restitution tridimensionnelle complète du palais Royal de Turin, s'intéresse à l'évaluation des capacités des modèles métriques pour décrire l'architecture. Différents réseaux de points connectés les uns aux autres hiérarchiquement, sont organisés pour collecter les données spatiales de chaque chambre du palais. Les auteurs attirent l'attention sur le fait que les études architecturales et historiques ont certainement besoin de modèles 3D, mais qu'il est nécessaire se demander quel type de détail ou d'information on attend qu'un modèle soit capable de restituer. Les données de départ pour la création des modèles géométriques sont extraites à partir du relevé topographique du bâtiment entier. Ce relevé est géré à l'aide d'une collection de réseaux topographique entourant l'édifice, chaque niveau, et enfin chaque chambre. Des les premières phases, la sélection des parties à modéliser est orientée en fonction des différents besoins descriptifs (volumes simples, restitution de détails significatifs, restitution de l'apparence visuelle des matériaux ou de leur état de conservation). Une fois consolidé l'ensemble des réseaux dans un repère commun, deux approches de restitution sont proposées : la première concerne la séquence de places et chambres assignées aux servants et inclue les escaliers et les voies de communications internes ; l'autre est employée pour la restitution du grand salon du « piano nobile ». Pour la première approche, plusieurs acquisitions métriques sont concentrées sur

les dimensions essentielles identifiant les points significatifs des éléments architecturaux typés (principalement des voûtes). Chaque forme architecturale est modélisée séparément pour être exprimée ensuite dans le repère commun en assurant ainsi les adjacences avec les autres formes et les relations avec les structures d'ensemble. La seconde stratégie d'acquisition, qui concerne les éléments d'intérêt particulier, s'appuie sur l'intégration de méthodes de restitution

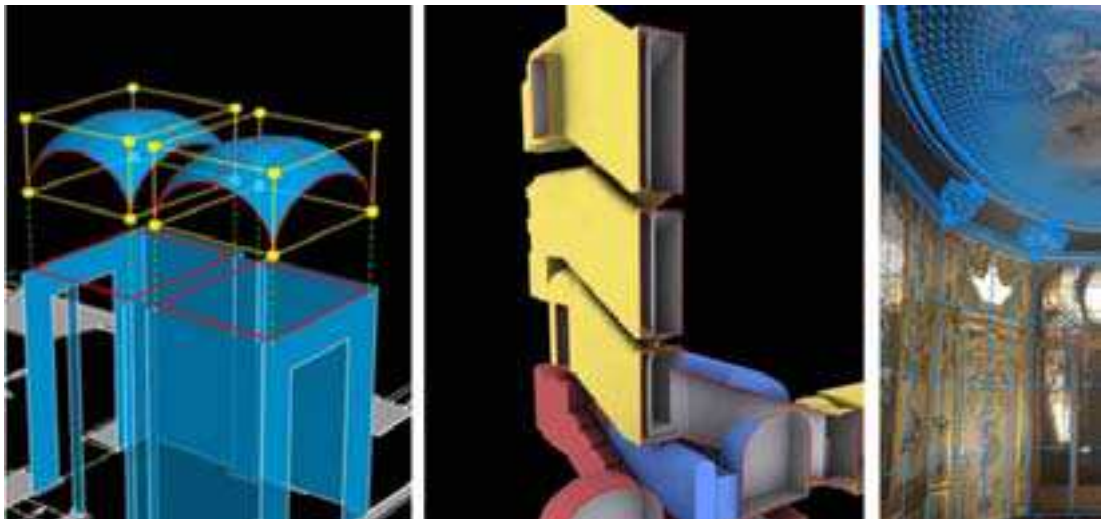
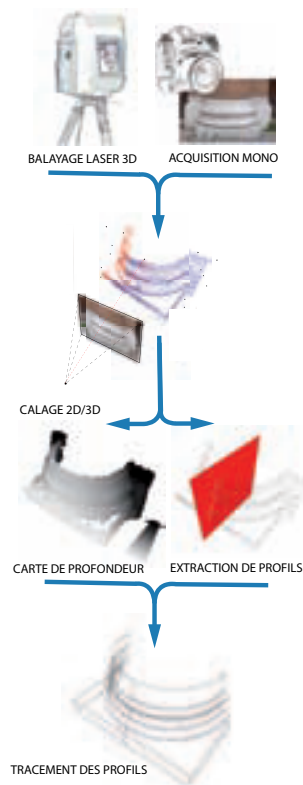


Figure 18. Modèle 3D du Palais Royal de Turin, Italie. De gauche à droite : la restitution des entités architecturales; les voies de communication internes ; le salon du « piano nobile » obtenu par intégration de photos redressées sur un réseau de points. Dans [Bonora et al., 2003].

photogrammétrique. Le redressement de photos est employé pour l'extraction d'un réseau de points décrivant les détails des surfaces et pour le plaquage de textures. La première méthode de restitution vise à la connaissance des caractères constructifs de l'édifice et à la description des relations entre les unités constituant l'ensemble. La seconde ajoute aux descriptions sommaires l'analyse des peintures et des décorations. La deuxième méthode permet aussi l'analyse de l'instabilité, la détérioration des matériaux ou la simple déformation des objets.



Dans le but de conduire des analyses sur l'état de conservation de chaque partie d'un édifice [Alshwabkeh et al., 2004] développent une approche hybride qui combine balayage laser 3D et photogrammétrie. Pour l'intégration des deux systèmes de mesure, tous les ensembles de données doivent être considérés dès la première phase de traitement. Cette intégration est réalisée en alignant des arêtes extraites à partir des deux sources de données (sélectionnées sur l'image et sur le nuage de points) et en utilisant un algorithme développé par [Klinec and Fritsh, 2003]. Cet algorithme transforme les lignes 3D extraites du nuage de points en lignes 2D sur l'image. Les paramètres externes inconnus de l'appareil photo sont alors déterminés par résection spatiale. L'extraction des arêtes dans le nuage de points est accomplie par la sélection de lignes résultantes de l'intersection entre deux surfaces planes, tandis que les arêtes correspondantes dans l'image 2D sont extraites de façon manuelle ou semi-automatique (segmentation d'arêtes). Au moins trois lignes conjuguées sont nécessaires pour obtenir une solution unique de résection spatiale. Une fois calculés les paramètres de position et d'orientation des stations laser par rapport à l'image, des cartes de profondeur sont générées dans le but de fournir à l'image la troisième dimension. Enfin, un processus de segmentation d'image est utilisé pour extraire tous les détails que les surfaces présentent. Les réseaux de points 2D extraits par ce procédé sont alors projetés dans l'espace en exploitant les

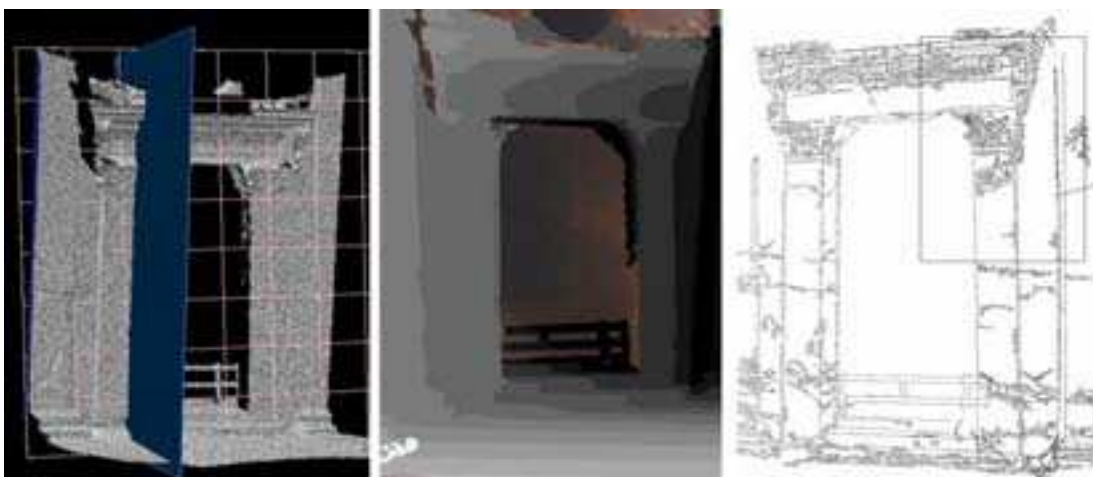
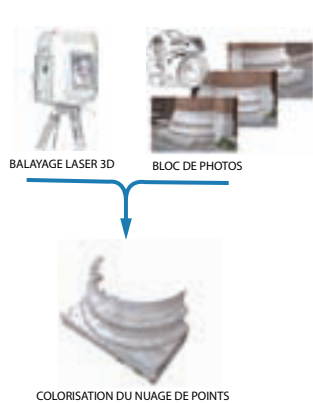


Figure 19. La porte latérale gauche de Al-Khasnesh, Jordanie. Deux surfaces planes en intersection avec le nuage de points (gauche). La carte de profondeur projetée sur la photo (centre). Les entités 3D extraites : les coordonnées de la partie interne d'un des deux piédroits (manquantes dans le nuage de points initial) sont acquises à partir des images (droite). Dans [Alshwabkeh et al., 2004].

informations (distances) contenues dans la carte de profondeur. Une détection d'arêtes basée sur le filtre de *Lanser* est enfin appliquée sur trois images calées sur le nuage de points. Au total, la représentation des lignes caractéristiques extraites contient 1436 points, où le nuage de points d'origine comptait presque 1.1 millions de coordonnées. De plus, ce processus peut exploiter l'extraction semi-automatique d'entités sur les images pour combler les zones d'ombre du nuage de points issu du balayage laser.

3.2.3 Approches visant à la restitution de l'apparence visuelle

Ces approches se concentrent sur la restitution de l'aspect visuel des surfaces qui composent l'objet d'étude. Les procédés adoptés dans les expériences citées dans cette section associent des informations photométriques à la description géométrique des objets. Le niveau de description géométrique exploitée pour le rendu est très variable : il peut être représenté par les simples points d'un nuage, par un réseau approximatif de polygones, ou par des mailles polyédriques très fines.

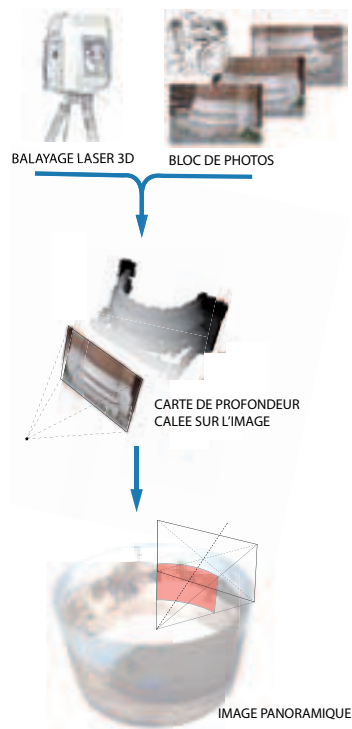


Pour la réalisation de représentations tridimensionnelles photoréalistes d'objets architecturaux [Abmayr et al., 2004] proposent une solution pour enrichir les nuages de points avec les valeurs colorimétriques acquises par une caméra haute résolution intégrée au système de balayage produit par la société Zoller+Fröhlich. La caméra, développée en collaboration avec la German Aerospace Center (DLR), consiste en une unité pivotante qui intègre une caméra DTC capable d'acquérir des images à 10200 x 500000 pixels. L'acquisition laser et photographique est effectuée l'une après l'autre. Une fois la numérisation laser terminée, la caméra est montée sur le même pied à l'aide d'un adaptateur qui assure le positionnement précis du centre optique de la caméra sur celui du scanner. Cela permet (par la simple

détermination du paramètre de rotation horizontale de la caméra) de superposer l'image sur le nuage de points. Cette procédure consiste à associer les attributs RVB extraits de l'image à chaque coordonnée du nuage de points. La figure 19 illustre un nuage de points enrichi par cette technique.



Figure 20. À gauche, le principe de l'acquisition des données par le capteur laser et la caméra HD. À droite, le hall du château Neuschwanstein : l'image de luminance du scanner est mélangée avec les valeurs RVB correspondantes acquises par la caméra. Dans [Abmayr et al.; 2004].



[Salemi et al., 2005] présentent une expérimentation pour l'intégration d'images panoramiques dans un nuage de points issu d'un relevé laser. L'objectif est d'associer des informations métriques à un système pour l'exploration de panoramas cylindriques. L'intégration est basée sur la fusion des données issues de deux systèmes d'acquisition. À partir d'une numérisation panoramique (360°) avec un module de balayage temps de vol et d'une acquisition photographique faite par la caméra embarquée dans le scanner (calibrée préalablement par les constructeurs du scanner), les auteurs focalisent sur l'extraction d'entités caractéristiques sur les images issues de la phase d'acquisition. Le processus d'extraction d'entités se base sur trois phases : la première est l'application d'un filtre « Edge-Sobel » sur les valeurs d'intensité acquises par le scanner (nuances de gris). La seconde est l'application du même filtre en utilisant la modalité « Keep sign of result (dans une seule direction) » sur les valeurs RVB de l'image. De cette manière les arêtes sur l'image sont contournées. Une application de la méthode a été expérimentée à l'occasion du relevé du bâtiment « Suriano Bellotto » à Venise (figure 21). Trois images sources ont été utilisées pour le traitement : l'image panoramique en couleurs visible, l'échelle d'intensité en nuances de gris, la carte de profondeur.

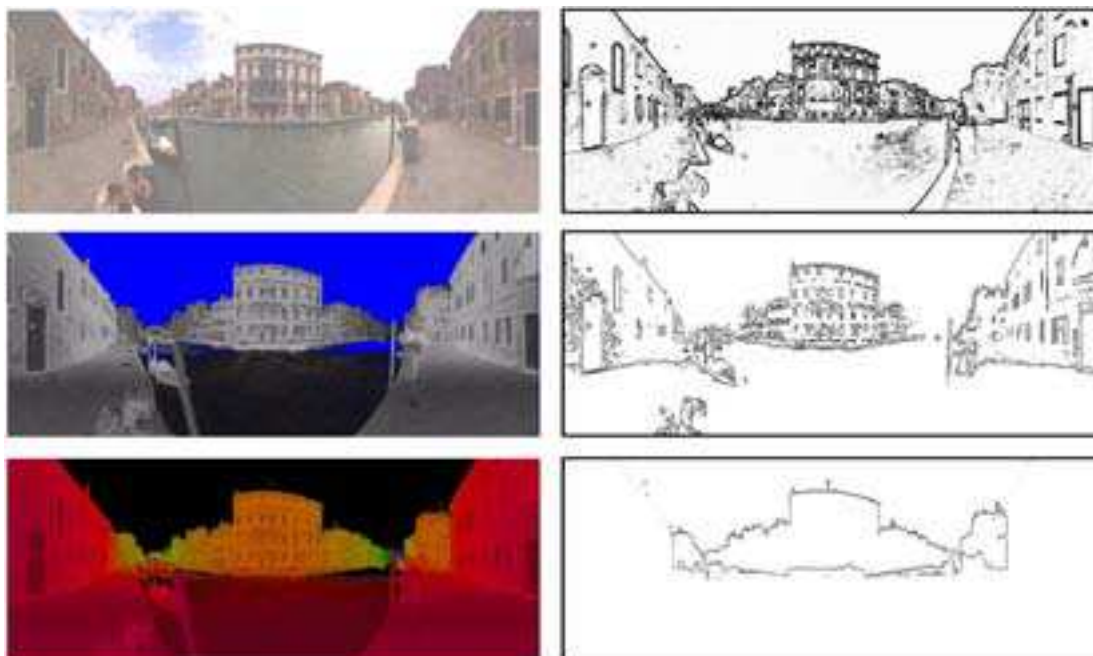
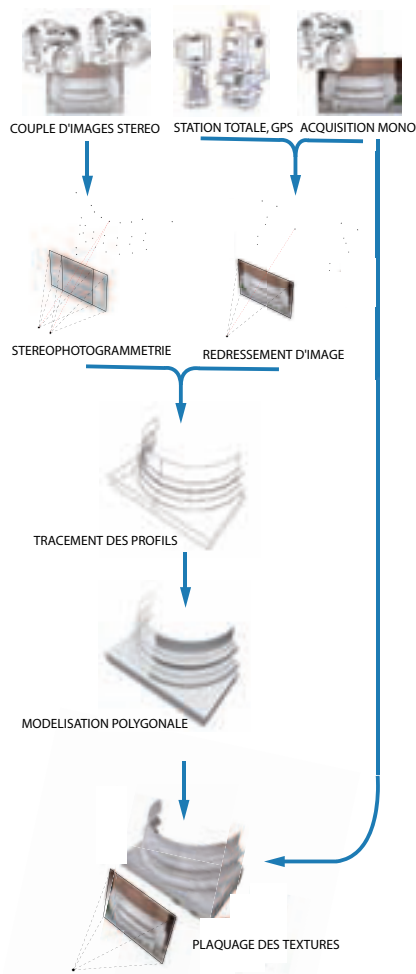


Figure 21. Acquisition laser panoramique à Venise. À gauche, images de l'acquisition laser. À droite, les images filtrées correspondantes. De haut en bas : l'image en vraies couleurs, l'image d'intensité en nuances de gris, la carte de profondeur. Dans [Salemi et al., 2005].



[Buehrer et al., 2001] utilisent trois sources de données dans la documentation de l'église de Saint George en Ethiopie. La première est la photographie aérienne existante à l'échelle de 1:10.000 recouvrant l'environnement dans lequel l'église se situe. La seconde est un réseau de points GPS pris au sol pour faciliter le référencement de l'image aérienne et pour fournir une liaison entre le système de référence local utilisé par la photogrammétrie terrestre et le réseau géodésique. La troisième est l'imagerie terrestre, exploitée pour l'élaboration de la triangulation photogrammétrique, la restitution du modèle géométrique et le plaquage des textures. Une mesure topographique de points d'appui sur l'église a été accomplie pour la consolidation des différents réseaux de coordonnées acquises par photogrammétrie multi-images. Les points d'appui sont à la fois des cibles artificielles attachées sur les surfaces de l'objet et à la fois des points sélectionnés sur l'édifice. Cette dernière catégorie de points se localise sur les entités d'intérêt (arêtes et sommets) facilement repérables sur les photographies. Le résultat de l'acquisition photogrammétrique en configuration mono et stéréo est un nuage de points pertinents. Certaines de ces coordonnées sont utilisées pour la génération des modèles 3D basés sur un logiciel de CAO, tandis que d'autres sont destinées exclusivement au calcul des paramètres d'orientation externe des caméras, à la génération d'orthophotographies et à l'extraction des textures par projection plane. Le résultat final (figure

21) est un modèle qui exprime de façon très détaillée les caractères d'apparence visuelle des surfaces restituées par une géométrie approximative.

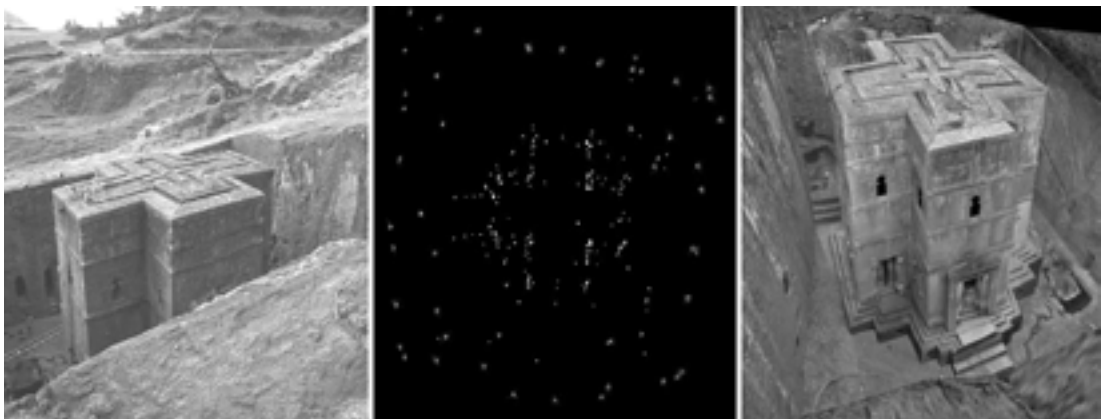
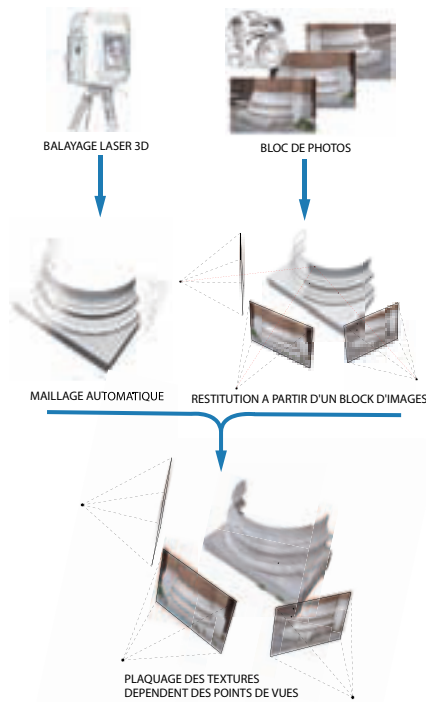


Figure 22. Eglise de St George en Ethiopie. Photo de l'état actuel (gauche). Nuage de points restitué à partir d'un bloc d'images (centre). Modèle 3D texturé reconstruit par techniques de modélisation polygonale et enrichi par les textures extraites à partir des photographies originales (droite). Dans [Buehrer et al., 2001].

3.2.4 Approches visant à la restitution de plusieurs aspects à la fois

Ces approches sont basées sur l'utilisation complémentaire ou sur l'intégration de différents procédés techniques. Plusieurs méthodes d'acquisition sont exploitées pour la restitution des différents aspects qui participent à la représentation exhaustive de l'objet étudié. En phase d'acquisition, la saisie d'informations métriques et photométriques est prise en compte en fonction des différents niveaux de complexité géométrique que l'objet d'étude présente et par rapport aux contraintes spécifiques du système de représentation choisi.



[El-Hakim et al., 2003] développent une approche intégrée pour la modélisation complète d'édifices architecturaux. Les auteurs utilisent différentes techniques de relevé choisies en fonction de deux procédures de reconstruction distinctes dans le but de générer un modèle photoréaliste pour la déambulation en temps réel. Les deux techniques de restitution complémentaires identifiées se basent respectivement sur l'acquisition photographique de blocs d'images et le balayage laser 3D. La première méthode est concentrée sur l'acquisition d'éléments architecturaux typés, tandis que la deuxième est destinée à l'acquisition d'éléments de décor. En ce qui concerne la phase de reconstruction tridimensionnelle, la structure entière, à l'exception des détails fins, est restituée en utilisant une technique de modélisation

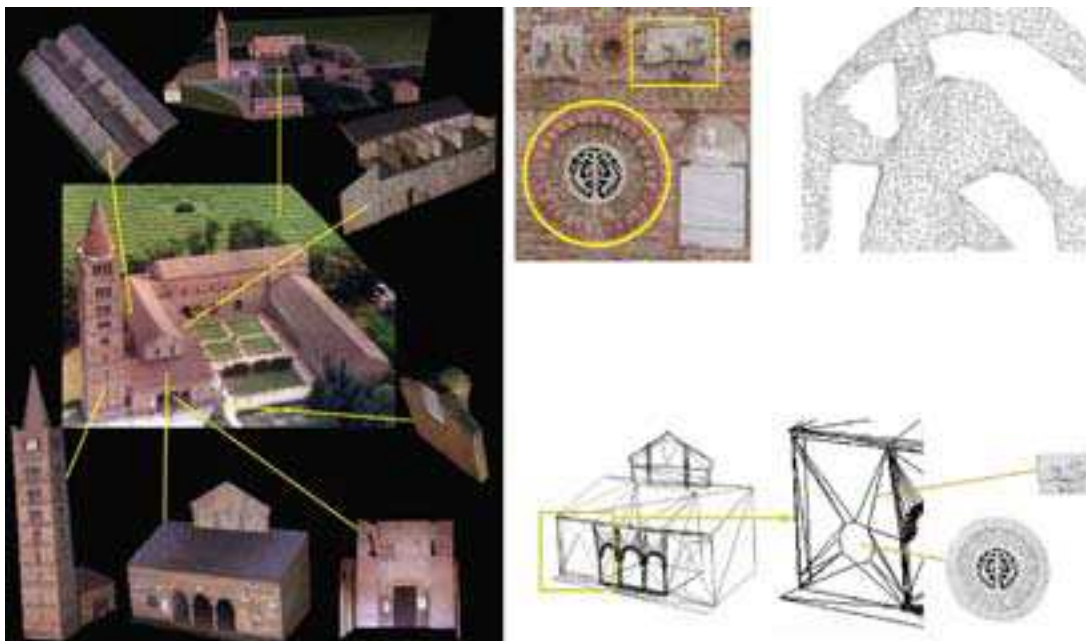
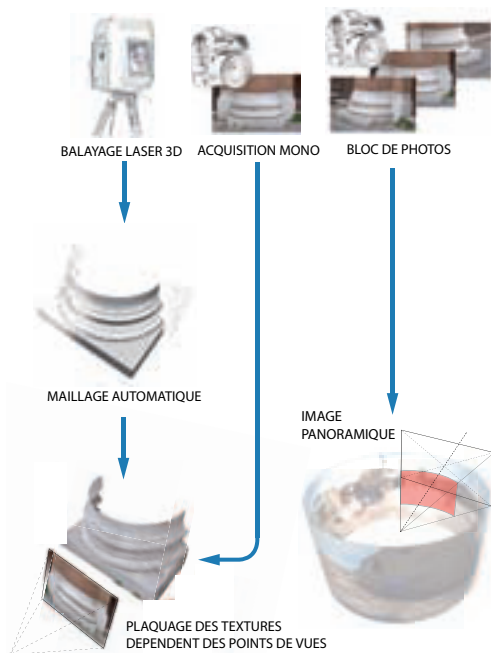


Figure 23. L'abbaye de Pomposa, Italie. Modèles 3D texturés de l'ensemble, obtenus par techniques de photo-modélisation (gauche). Régions acquises par balayage laser et maillées automatiquement (haut-droite). Intégration des modèles de détails dans le modèle général (bas-droite). Dans [El-Hakim et al., 2003].

basée sur l'image. Cette méthode restitue une géométrie cohérente avec la description morphologique des éléments typés qui composent l'édifice et s'appuie sur l'extraction et le plaquage des textures à partir de photographies de l'objet réel pour l'enrichissement de la maquette par les détails de surface présents sur les photographies. Au contraire, les parties de l'édifice exigeant une description géométrique fine, sont obtenues par maillage automatique du nuage de points issu de l'acquisition laser 3D. Pour la reconstruction des éléments typés (colonnes, arcs, voûtes, etc.) les auteurs utilisent des primitives préalablement modélisées qui contiennent la description du modèle théorique de l'entité à reconstruire. Ces primitives sont divisées en sous-éléments logiquement et hiérarchiquement organisés. L'instanciation des primitives est conduite par le positionnement de quelques points de référence (sommets significatifs facilement repérables dans les images) à partir desquels la déformation de la primitive entière est établie. Il s'agit d'une approche photogrammétrique qui fournit un bon niveau d'automatisation à l'utilisateur pour la restitution approximative des formes. Concernant l'intégration des parties de détails scannées, dans le modèle général de l'édifice, des points communs sélectionnés sur les modèles issus des procédures de photo-modélisation et sur les modèles issus du maillage automatique du nuage de points sont employés par un procédé de consolidation. La maille triangulée du photomodèle est enfin ajustée finement (par une procédure manuelle) sur les points décrivant le périmètre de l'élément reconstruit par maillage polyédrique fin.



[Allen et al., 2004] ont développé une approche pour la restitution géométrique et photométrique détaillée de fouilles archéologiques. Même si le terrain d'expérimentation cité dans cette expérience diffère de nos préoccupations, nous la jugeons particulièrement intéressante d'un point de vue technique. La phase d'acquisition de cette approche est basée sur l'intégration de photographies numériques, images panoramiques, scanner laser, données SIG (Système d'Informations Géographiques). L'objectif est l'exploitation des modèles générés dans un dispositif de visualisation immersive. La géométrie est acquise par un scanner laser temps de vol et une acquisition photographique est utilisée pour fournir les textures nécessaires à la restitution des caractères visuels des surfaces. Les différentes stations de balayage laser sont consolidées et géoréférencées au travers d'un ensemble de coordonnées saisies avec un GPS différentiel. La

génération des surfaces par maillage automatique à partir des nuages de points est réalisée en utilisant VripPack [Curles et al., 0000]. L'acquisition des textures est faite à partir d'un appareil numérique à 6 millions de pixels préalablement étalonné et monté directement sur le module de balayage laser. Les paramètres extrinsèques de la chambre (coïncidents avec la position et l'orientation du scanner à l'exception de la parallaxe), exprimés en coordonnées locales, sont transformés dans le repère global du site. Le modèle résultant du maillage polyédrique et du plaquage des textures est ainsi intégré à un ensemble d'informations graphiques vectorielles (plan bidimensionnel) gérées dans un SIG. Pour ajouter au modèle obtenu les informations concernant le contexte environnemental, les auteurs associent à la reconstruction métrique



Figure 24. Acropole de Monte Polizzo. Cibles positionnées dans l'aire à reconstruire (gauche). Modèle 3D texturé intégré aux données SIG et à une image panoramique du paysage (droite). Dans [Allen et al.; 2004].

et photométrique des surfaces, des images panoramiques cylindriques. Une acquisition panoramique complète utilisant 38 images est effectuée, et les coordonnées du centre optique de la chambre utilisée sont acquises par une station totale. Une fois référencée, cette image est utilisée comme texture plaquée sur un cylindre entourant le modèle géométrique réalisé.

3.2.5 Analyse critique des expériences présentées

Dans un grand nombre d'expériences que nous avons citées, on peut remarquer que les traitements adoptés par les auteurs pour la restitution des objets d'étude sont fortement conditionnés par la méthode d'acquisition utilisée (scanner laser ou photogrammétrie). Cela dérive principalement du fait que ces expériences s'appuient sur l'utilisation de solutions commerciales spécialisées dans le traitement d'un type spécifique de donnée d'entrée : logiciels pour la restitution photogrammétrique ou pour le traitement de nuages de points issus d'un balayage laser.

Dans le cas spécifique des restitutions à partir d'une acquisition laser en plus, les deux expériences citées [Fangi et al. 0000 ; Malinverni et al. ; 0000] démontrent les limites que ces solutions commerciales présentent par rapport au problème de la restitution d'un bâtiment entier. De plus, il faut remarquer que ces expériences traitent des nuages de points concernant juste des parties d'édifices (façades) ou des objets de petite taille dont les nuages de points ne dépassent pas les 3 millions de coordonnées. Dans les expériences que nous avons conduites sur l'acquisition complète de complexes patrimoniaux, les nuages de points résultants du relevé contiennent facilement entre 25 et 80 millions de points.

En ce qui concerne les expériences qui combinent ou intègrent deux sources d'acquisition on peut remarquer qu'à une grande variété de traitements (maillage automatique, modélisation manuelle à partir de points pertinents, modélisation basée sur les images, enrichissement de la géométrie par des informations photométriques, etc.) s'oppose, un nombre fini de modalités d'acquisition : balayage laser, restitution photogrammétrique (mono, stéréo et multi-images). Les véritables différences entre ces approches intégrées se manifestent plutôt dans la phase d'extraction d'informations pertinentes. Une réflexion doit être menée à ce propos. Dans le cas des méthodes d'acquisition d'un nuage de points systématiques (balayage laser principalement), seulement une certaine quantité d'informations est exploitée en phase de restitution : des partitions du nuage de point sont échantillonnées pour appliquer les procédures de maillage automatique ou des profils ou des points particuliers sont extraits pour isoler les seules zones d'intérêt. Le même discours peut concerner les méthodes d'acquisition photogrammétriques : les

informations pertinentes sont extraites des images avec une densité liée aux objectifs spécifiques de la restitution : détails des surfaces, contours des éléments, ou points caractéristiques. La sélection de points répond en effet aux finalités d'une représentation qui exprime des besoins spécifiques à un type d'interprétation ou d'analyse. En phase d'acquisition comme en phase d'exploitation, la notion de point de vue surgit alors avec évidence.

En ce qui concerne les problèmes de représentation, la division en catégorie que nous avons proposée en fonction des objectifs de la restitution, nous offre déjà un point de départ pour affronter cette problématique. En effet, sauf pour les expériences qui appartiennent à la catégorie qui se préoccupe d'orienter la phase de relevé en fonction de la restitution d'un aspect précis, les autres expériences se préoccupent exclusivement de reproduire le modèle géométrique de l'objet existant (avec ou sans textures) sans aucune référence à un objectif de représentation à caractère descriptif. D'ailleurs le fait que les expériences qui s'en préoccupent soient basées sur la restitution photographique témoigne bien que l'exploitation des nuages de points issus d'un scanner laser, ainsi que la modélisation géométrique de formes soit encore une problématique inexplorée dans le domaine de la représentation architecturale. Quel que soit le dispositif d'acquisition utilisé, les préoccupations d'une restitution architecturale restent en effet inchangées : extraire de la mesure de l'objet une représentation intelligible des caractères qui décrivent sa morphologie.

3.3 Présentation de l'approche proposée

3.3.1 Préoccupations retenues

À partir des conclusions que nous avons tirées de l'analyse des différentes expériences présentées, nous isolons trois préoccupations distinctes pour la définition de notre approche de restitution d'objets architecturaux.

Collecte des données. La collecte de données dimensionnelles d'un objet architectural nécessite en général un nombre très important de relevés. Même en utilisant différents dispositifs d'acquisition à la fois, il est rare d'arriver à collecter une quantité d'informations satisfaisante pour plusieurs exploitations dans une seule campagne. Un besoin important est alors celui de concevoir un système capable d'intégrer des acquisitions provenant de différents dispositifs et éventuellement effectuées à des moments différents. La vitesse d'acquisition ainsi que les capacités de mémorisation que les outils informatiques offrent aujourd'hui rendent envisageable de considérer le relevé d'un édifice comme le support pour diverses exploitations en fonction de différents objectifs. Il est donc nécessaire de se concentrer sur l'identification d'une stratégie d'acquisition exhaustive qui prend en compte non seulement la complexité géométrique et la variété d'éléments de l'édifice étudié, mais aussi un ensemble de modalités d'extraction d'informations nécessaires pour l'élaboration de représentations multiples.

Nature géométrique d'éléments architecturaux. En regardant un édifice on distingue avant tout sa forme globale, composée généralement par des éléments typés comme des colonnes, gradins, fenêtres, portes, voûtes. Ces éléments sont généralement caractérisés par des arêtes vives et bien reconnaissables sur l'objet réel ainsi que sur les photographies. On distingue encore les éléments de décors, qui présentent généralement une géométrie complexe et irrégulière qui peut bien être décrite par des nuages de points à haute densité. En fonction de la différence morphologique entre ce deux types d'éléments, des procédures distinctes pour la restitution doivent alors être identifiées. Cette division peut être conduite en fonction d'un critère d'échelle (élément architectural, élément de décors, etc.) ou en fonction d'un critère

de complexité géométrique (surfaces simples ou linéaires, surfaces complexes, etc.). Déjà en phase de relevé, cette lecture par échelle ou par niveaux de complexité est par conséquent une clef indispensable pour déduire la quantité d'informations nécessaires à la restitution de l'objet. De plus, beaucoup d'édifices du patrimoine témoignent de l'utilisation de formes appartenant à un langage codé. Ces éléments ont fait l'objet de plusieurs théorisations dans l'histoire de la représentation architecturale. Les traitées d'architecture peuvent alors servir de support pour conduire l'interprétation géométrique des éléments typés. Pour être conforme aux valeurs qu'un dessin d'architecture exprime, une restitution tridimensionnelle doit en effet tenir compte de ces codes de représentation.

Représentation en fonction d'un objectif. Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, une représentation dépend toujours d'un objectif. Parmi les différentes expériences citées, ces objectifs concernent la restitution de l'état actuel de l'édifice, l'analyse de l'état de conservation des surfaces, la production de maquettes 3D pour la diffusion culturelle, ou l'extraction d'informations dimensionnelles. Il est donc évident de bien identifier ces objectifs et de les isoler en catégories pour créer les conditions permettant d'élaborer des représentations pertinentes. Ensuite, une question importante concerne le besoin d'organiser la documentation graphique produite en fonction de la description de l'édifice. Cette documentation peut à la fois contenir des représentations élaborées à partir du relevé de l'objet ou peut aussi inclure des informations hétérogènes (photographies, textes, dessins, etc.). Il est alors nécessaire de créer les conditions par lesquelles les observations, les analyses et les représentations produites pourront être organisées autour de la description même de l'édifice.

D'un point de vue technique, la mise en place d'un dispositif capable de répondre aux préoccupations identifiées présente un ensemble de difficultés :

- Pour le relevé, la nécessité d'établir des relations entre les différentes sources d'acquisition afin de le fusionner dans un support efficace pour l'extraction d'informations pertinentes.
- Pour la modélisation géométrique, des méthodes et outils spécifiques aux problèmes de restitution qui permettent de décrire les formes au travers des conventions de la représentation architecturale ;
- Pour la représentation, le besoin d'identifier des procédures adaptées à différentes exigences d'analyse et la nécessité d'organiser les différentes représentations résultantes de ces traitements, autour de la morphologie de l'objet. ;
- Enfin, la possibilité de stocker les différentes élaborations produites et de les rendre accessibles à la consultation.

3.3.2 Structure de l'approche

En conformité avec les problématiques énoncées, l'approche est divisée en trois phases principales :

- La première est le relevé de l'objet qui inclue les propriétés métriques et photométriques ;
- La seconde est la construction du modèle géométrique et son enrichissement par les informations photométriques et dimensionnelles ;
- La dernière phase focalise sur la structuration sémantique du modèle 3D pour permettre une organisation efficace des représentations produites.

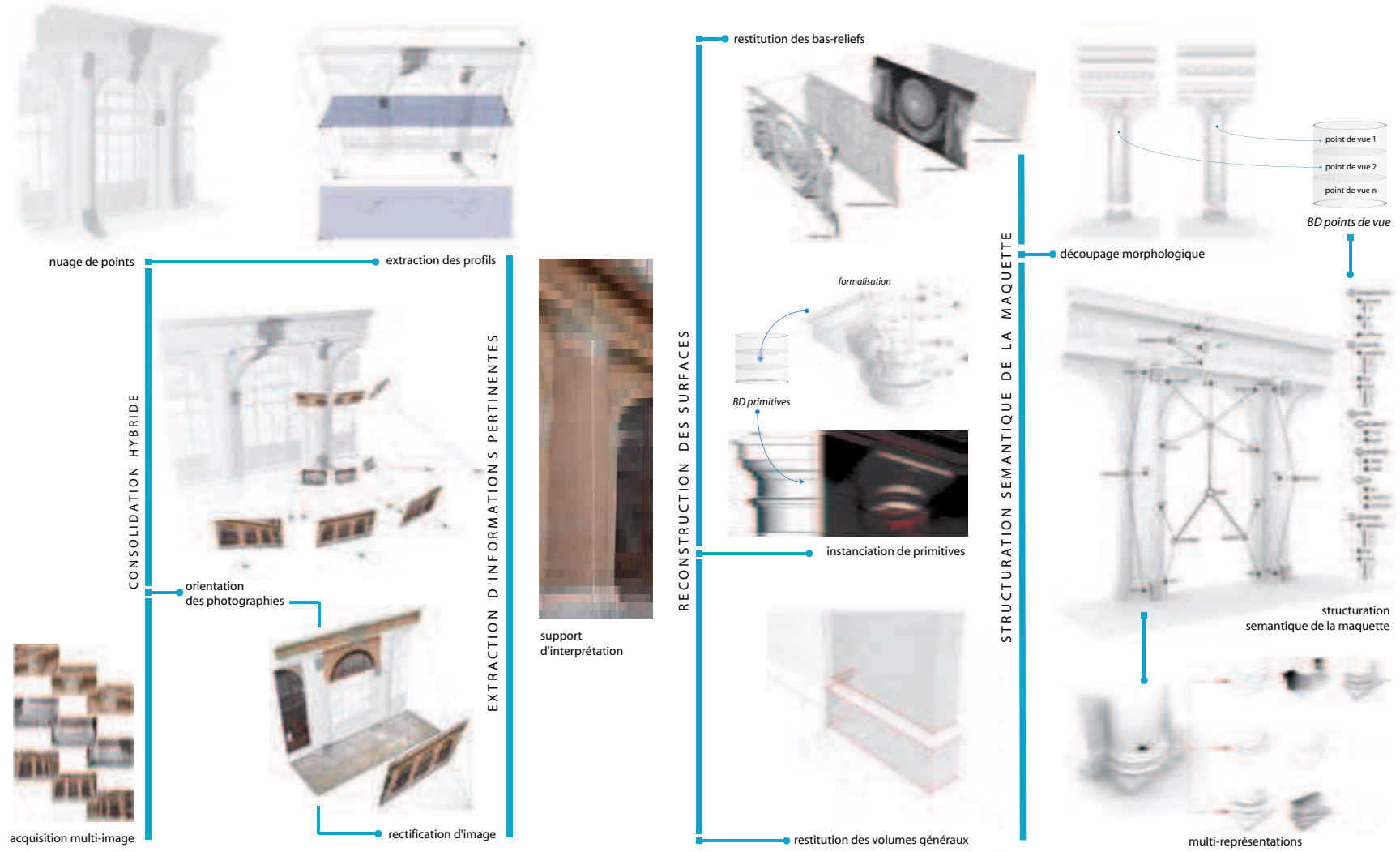


Figure 25. Schéma général de l'approche hybride de restitution tridimensionnelle proposée

Pour chaque phase, l'approche introduit et exploite les connaissances architecturales comme support pour l'interprétation et la restitution de formes. En combinant les techniques de balayage laser et de modélisation basée sur l'image, le processus de reconstruction des surfaces utilise d'un côté les nuages de points pour extraire des profils significatifs et pour créer des polyèdres triangulés ; de l'autre côté, les photographies numériques pour couvrir les zones d'ombre du nuage de points, pour collecter des coordonnées additionnelles et pour extraire des textures. Du point de vue de l'interface utilisateur, le nuage de points et les images numériques constituent respectivement le support métrique et visuel.

L'approche est organisée comme suit :

Une stratégie de relevé en fonction de la morphologie, des dimensions et des aspects superficiels de l'édifice basée sur :

- Le balayage laser 3D pour l'acquisition des volumes globaux, des profils caractérisants les éléments typés et la géométrie complète des éléments de décor sculptés ;
- L'acquisition photographique structurée en fonction de la composition architecturale de l'édifice et tenant compte des différentes échelles en configuration mono ou multi-images ;
- La consolidation hybride (fusion de données) des nuages de points et des photographies pour la création d'un support efficace pour l'interprétation de la forme et l'extraction de ces profils pertinents.

Un processus de modélisation, dans lequel on reconstruit le modèle géométrique en utilisant les informations issues de la phase de relevé basé sur :

- L'introduction des photographies comme support visuel pour les phases de modélisation ;
- La segmentation du nuage de points en trois catégories principales qui déterminent la procédure de modélisation adoptée :
 - Pour les volumes généraux, procédures manuelles de génération des surfaces à partir des profils significatifs ;
 - Pour les éléments typés, procédures d'instanciation manuelles ou semi-automatiques de primitives générées par un processus de formalisation des connaissances architecturales à partir de l'analyse des traités d'architecture ;
 - Pour les décors sculptés, procédure automatique de reconstruction approximative par maillage quadrangulaire à résolution variable.

Un processus de structuration de la maquette qui permet d'organiser les représentations multiples autour d'un modèle de description sémantique de l'édifice :

- Découpage morphologique de la géométrie de l'objet en fonction d'un point de vue ;
- Structuration hiérarchique des éléments qui composent l'ensemble en fonction d'une description sémantique ;
- Elaboration des représentations par des procédures spécifiques :
 - Représentations basées sur les points ;

- Segmentation du nuage de points en fonction du découpage morphologique ;
- Génération de cartes de profondeur ;
- Colorisation du nuage à partir des photographies orientées ;
- Représentations basées sur les courbes ;
 - Extraction de contours principaux et de profils significatifs ;
 - Extraction et structuration d'informations dimensionnelles ;
- Représentations basées sur les polyèdres :
 - Génération de modèles polygonaux à différents niveaux de résolution ;
 - Extraction et plaquage de textures à partir des photographies calibrées ;
 - Coloration interactive des polyèdres en fonction d'une analyse spécifique.

L'approche proposée est en cours d'implémentation dans un outil de reconstruction développé en langage MEL (Maya Embedded Language) de AliasWavefront et en C++ (voir annexe A).

3.4 Présentation de l'environnement de développement

Dans le but de valider le cadre de développement méthodologique, nous utilisons un environnement de programmation pour élaborer une maquette informatique incluant les procédures que nous présenterons dans les trois chapitres suivants. Compte tenu de la variété de traitement à gérer, le choix de l'environnement de développement informatique a été conduit en fonction des besoins suivants :

- Outils pour le contrôle tridimensionnel d'entités géométriques (points, surfaces, polyèdres) ;
- Fonctions de génération de surfaces (représentations paramétriques et par frontières) ;
- Fonctions pour la restitution de l'apparence visuelle (gestion de matériaux, textures, etc.) ;
- Implémentation de fonctions conçues ad hoc ;
- Développement d'une interface utilisateur pour gérer l'ensemble du processus de restitution ;
- Dialogue avec une base de données en ligne.

À partir de ces besoins, parmi les différentes solutions disponibles pour la modélisation 3D à architecture ouverte, nous avons choisie Maya, produit par AliasWavefront¹.

1. **AliasWavefront.** <http://www.alias.com>

3.4.1 MEL et C++

Maya permet la gestion complète de son noyau central à partir d'un langage script (MEL - Maya Embedded Language) et des API (Application Protocole Interface) C++. Les commandes MEL directement exploitables concernent :

- *Les fonctionnalités générales.* Il s'agit de commandes pour la gestion et la customisation d'attributs, de modalités d'affichage, de contextes de sélection et de manipulation d'entités dans l'espace ;
- *Les fonctionnalités de langage.* Cette catégorie contient les opérateurs mathématiques, ou le contrôle de chaînes de caractères et de flux du script ;
- *Les fonctionnalités de modélisation géométrique.* Toutes les fonctions pour la génération de surfaces sont complètement exploitables à partir de la création et de la manipulation de courbes (Bézier, B-splines) ou de surfaces (Nurbs, polyédriques et de subdivision) ;
- *Les fonctionnalités de rendu.* Ces commandes permettent la création et la manipulation de caméras, de sources lumineuses et de textures. D'autres fonctions permettent la création et la gestion d'effets de visualisation sophistiqués ;
- *Les fonctionnalités de système.* On retrouve la possibilité de contrôler le dialogue avec le système d'exploitation, avec des application externes, ou avec un navigateur web ;
- *Les fonctionnalités d'interface.* il s'agit des commandes pour la création et le contrôle des éléments d'interface graphique (fenêtre, menus, layouts, boutons, etc.) pour l'élaboration de l'interface utilisateur.

Le code produit peut enfin être compilé dans une application stand-alone. Dans cette optique il y a la possibilité de mélanger les fonctionnalité de Maya avec d'autres entièrement écrite en langage C++.

L'environnement de programmation offre les possibilités de :

Customisation. L'interface graphique entière de Maya (GUI-Graphical User Interface) peut être écrite et contrôlée au travers du langage MEL. Par conséquent il est possible d'élaborer une interface complète pour l'organisation des fonctions et des procédures conçues. L'interface concerne à la fois des éléments graphiques et des fonctions de manipulation des entités géométriques dans l'espace. En addition à l'interface utilisateur le langage permet aussi de customiser les options internes pour l'affichage des entités ainsi que pour le contrôle de leur apparence graphique.

Intégration. Dans le cas spécifique de notre problématique, le besoin d'intégrer différentes sources de données (nuages de points, photographies, points topographiques, etc.) est fondamental. Les interfaces de programmation permettent d'écrire des procédures d'importation, de conversion, et d'exportation des données. Grâce à l'accessibilité complète à toutes les données gérées par le système, MEL permet d'extraire des entités les informations nécessaires à leur conversion.

Automatisation. En exploitant la librairie de fonctions déjà présentes dans le langage, l'élaboration de procédures peut être conduit par automatisation de tâches. Cela offre la possibilité de produire des procédures qui utilisent une chaîne d'opérateurs configurables.

Extension. Grâce à l'utilisation combinée de MEL et C++ on peut créer des fonctionnalités spécifiques. Cela peut se faire de plusieurs manières : par exemple en utilisant MEL pour la récupération d'information sur les entités manipulées et des algorithmes en C++ pour le calcul d'opérations complexes. On peut aussi intégrer les deux et partir dans un sens inverse en récupérant des informations créées par un module externe en langage C++ et en les convertissant en entités MEL.

Finalement une dernière considération concerne les problèmes de portabilité. Maya est disponible pour plusieurs plateformes (Linux, Windows, Mac Os X, SGI). Compte tenu du fait que MEL est un langage interprété, à l'exception du code C++ implémenté, les procédures et les éléments d'interface créés sont complètement portables sur toutes les plateformes

3.5 Conclusions

Dans ce chapitre, après un état de l'art des approches de restitution actuelles, nous avons présenté une démarche méthodologique pour la gestion complète du processus de restitution tridimensionnel d'objets architecturaux. Pour chaque phase identifiée, notre approche combine plusieurs procédures et techniques présentées dans l'étude bibliographique du deuxième chapitre. Dans les trois chapitres qui suivent nous présentons d'abord les aspects méthodologiques relatifs à la phase traitée, puis nous expliquons les solutions techniques que nous avons conçues pour chaque problème spécifié.

Partie II

4. Consolidation hybride de différentes sources

Dans les chapitres précédents, nous avons vu comment les édifices architecturaux, à cause de leurs dimensions, permettent très rarement une acquisition complète et homogène des éléments qui les composent, au travers d'un système d'acquisition unique. Nous avons vu aussi que les résultats d'une acquisition photogrammétrique et laser constituent deux types d'informations différentes, les deux étant utiles à l'interprétation et à la restitution des éléments qui composent la scène. Ce chapitre traite la question de l'acquisition conjointe par scanner laser et appareil photo, ainsi que de la fusion des données résultantes de la phase de relevé. L'utilisation conjointe de données 3D et d'images a fait l'objet de travaux dans divers domaines de recherche. Les solutions proposées visent généralement à compléter les données 3D à l'aide de l'image [Baltzakis et al. 2002] [Alshawankeh et al. ; 2004]. L'intérêt de ces méthodes tient dans leur capacité à exploiter la complémentarité des données et notamment à substituer une information géométrique provenant de l'une des sources de données par une information plus précise ou plus facile à interpréter. Dans notre cas spécifique, nous nous intéressons principalement à l'exploitation de ces techniques dans le but de définir un support pertinent pour l'interprétation des formes relevées en phase de restitution.

4.1 L'acquisition des données sur le terrain

Dans ce paragraphe nous isolons des principes pour l'acquisition des données spatiales en utilisant de façon conjointe un scanner laser temps de vol et une caméra numérique. Nous structurons l'acquisition des données en fonction de deux critères principaux :

- Le premier basé sur l'identification de trois types d'éléments dans la lecture de la composition architecturale (volumes généraux, éléments typés, éléments de décor) pour structurer les données du relevé dès les premières phases de traitement ;
- Le second basé sur l'identification des faces dominantes de l'enveloppe (parallélépipède imaginaire) englobant chaque élément isolé.

La décomposition de l'objet peut suivre une logique qui résulte de la lecture des relations hiérarchiques que l'architecture exprime dans sa composition ou tout simplement en fonction de l'identification de faces dominantes de l'édifice (façades par exemple). Pour chaque élément isolé, nous conduisons l'acquisition d'information en fonction de la catégorie à laquelle il appartient (figure 26).

Volumes généraux. Pour les volumes généraux on conduit une acquisition laser à densité moyenne (maille entre 10 mm et 20 mm). Le nombre de stations nécessaires est à établir en fonction de la quantité d'occlusions que l'objet comporte. Des cibles artificielles sont utilisées dans le but de consolider les stations et de définir un système commun d'axes de référence. En ce qui concerne l'acquisition photographique la prise d'un bloc multi-images est effectuée en fonction du critère suivant : en se basant sur le parallélépipède (imaginaire) qui englobe l'élément on considère un point de vue frontal à chaque face dominante de l'élément et deux

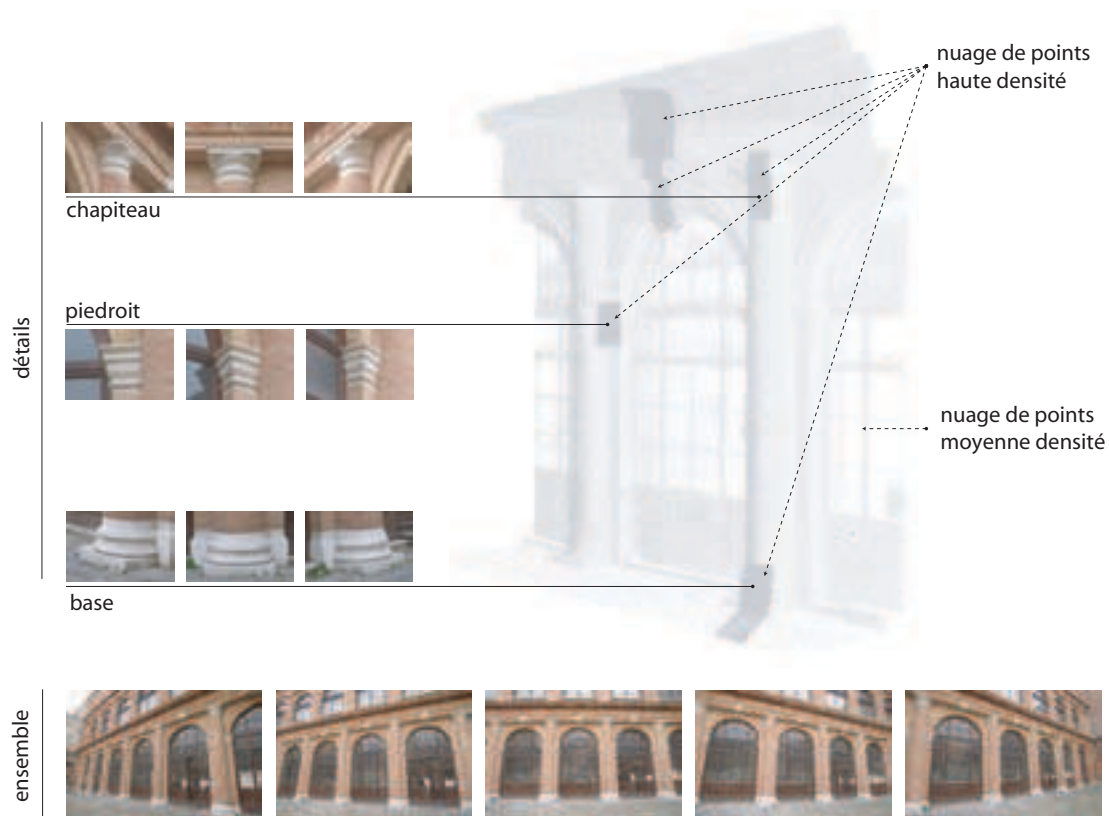


Figure 26. Stratégie d'acquisition de données. Nuages de points issus d'un balayage laser 3D à différents niveaux de densité et acquisition de blocs d'images.

points de vue (à 12 et 45 degrés environ) en tournant autour de la face dans les deux directions et en gardant la même distance que la première acquisition (figure 27).

Éléments typés. Pour l'acquisition des éléments typés, la logique est la même que pour les volumes généraux avec des niveaux de définition et un nombre de prises de vue différents. Pour le nuage de point on considère une maille comprise entre 3 et 5 mm pour une acquisition de l'élément entier et une maille de 1 mm pour l'acquisition des tranches définissant ses profils significatifs. En ce qui concerne l'acquisition photographique, pour chaque élément appartenant à cette catégorie, on acquiert des blocs d'images selon le même principe que nous avons expliqué précédemment. En fonction de la complexité morphologique de l'élément à restituer, le bloc d'images peut contenir de 3 à 5 photographies avec une toujours orthogonale à la face dominante.

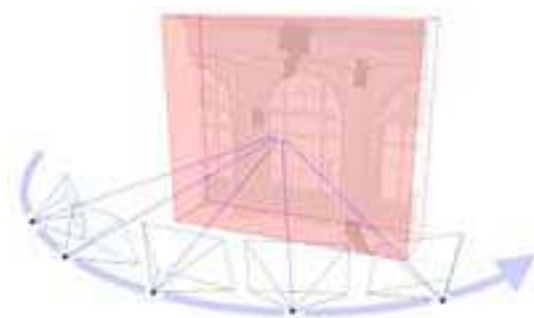


Figure 27. Schéma de l'acquisition des blocs de photographies.

Éléments de décor. Pour cette catégorie, on s'intéresse essentiellement aux décors intégrés aux éléments architecturaux. La statuare relève en effet d'autres problèmes que l'on ne traitera pas. Pour chaque élément de décor, on utilise une acquisition avec une maille de

points comprise entre 1 et 3 mm. Par rapport à l'acquisition photographique, en fonction de la forme de l'élément (bas-relief encadré dans un rectangle, ecoinçon d'arc, ou frise) la prise de vue peut inclure une simple photo prise frontalement ou un bloc d'images orthogonales à l'élément acquis par des déplacements latéraux avec un recouvrement de 50 pour cent environ. Ce recouvrement peut ensuite être exploité pour la fusion des images en mosaïque.

4.2 Consolidation hybride de différentes sources

Dans cette partie, nous présentons les procédures mises en place à partir des deux sources de données (nuage de points et photographies). On traitera d'abord la procédure de conversion pour l'affichage et la manipulation dans l'espace 3D des nuages de points issus du scanner laser, on s'intéressera ensuite aux problèmes d'orientation de photographies sur les nuages de points convertis.

4.2.1 Conversion des nuages de points

Après les premiers traitements (consolidation du nuage, échantillonnage, réduction du bruit, etc.) effectués par les logiciels fournis avec le dispositif d'acquisition laser, les nuages de points peuvent être enregistrés sous la forme de fichiers ASCII. Le capteur laser utilisé dans notre cas permet d'acquérir les informations spatiales suivant trois modes différents : le premier appelé *xyz* contient pour chaque ligne du fichier trois valeurs représentant les coordonnées spatiales du point. Le deuxième, appelé *xyzG*, ajoute à chaque point une valeur d'intensité comprise entre 0 et 255 nuances de gris. Comme on l'a déjà dit, cette valeur caractérise la réponse du matériau de l'objet au point de contact du faisceau laser. Le troisième mode, appelé *xyzRVB* décrit aussi les informations colorimétriques du point acquis avec les valeurs rouge, vert et bleu obtenues à partir de la caméra calibrée embarquée dans le dispositif d'acquisition. Pour manipuler des nuages de points à l'intérieur de notre maquette informatique nous avons mis au point une procédure capable de traduire les informations stockées dans un fichier ASCII en entités manipulables dans l'espace 3D en temps réel. En MEL, les entités géométriques les plus adaptées à la représentation de nuages de points 3D sont les systèmes de particules. Un noeud *particle* peut en effet associer des attributs spécifiques à chaque élément qui le compose (*per-particle attributes*). La procédure développée crée un noeud particule pour représenter le nuage dans la scène 3D. Les coordonnées spatiales sont transformées en attributs de position tandis que la valeur d'intensité ou *rvb* sont traduites en attributs couleur. Cette procédure, développée en langage C++ lit le fichier ASCII, reconnaît automatiquement la structure du nuage de points présent dans le fichier (*xyz*, *xyzG*, *xyzRVB*) et permet de convertir l'unité de mesure ainsi que l'orientation absolue du nuage. Quelques problèmes ont dû être résolus dans la génération du nuage par script. En effet, Maya ne peut pas exécuter plus que 500000 lignes dans un script. Cette limitation est forcément incompatible avec la taille de fichier que l'on manipule habituellement dans un relevé d'édifice. Par conséquent, nous procédons par l'écriture d'une scène Maya en format ASCII enregistrée dans un fichier temporaire et chargé automatiquement dans l'environnement. Cette solution ne présente pas de limitations en terme de quantité de points. Par contre, une limitation concerne le nombre de points manipulables aisément en temps réel (5 millions de points). Le découpage en plusieurs fichiers est alors envisageable pour le traitement de nuages de points de taille plus importante.

4.2.2 L'orientation des photographies sur le nuage de points

Différentes recherches se sont concentrées sur le problème de l'orientation de

photographies sur un ensemble de coordonnées connues. Beaucoup de recherches se sont concentrées sur les méthodes de recalage 2D/3D, c'est-à-dire les méthodes de mise en place d'une ou plusieurs images par rapport à un objet 3D. La plupart de ces méthodes issues de la communauté photogrammétrique ou de la vision par ordinateur sont construites autour de l'appariement de points. La procédure consiste à estimer la matrice de projection d'une caméra à partir de correspondances sélectionnées respectivement dans l'espace 3D et sur l'image 2D. Le calcul de la matrice de la caméra est connu sous le nom de *résection spatiale* [Hartley, 2003]. La forme la plus simple de correspondance est établie entre un point 3D «X» et sa projection sur l'image «x» dans un plaquage inconnu d'une caméra. Cette superposition peut être considérée linéaire si les images utilisées n'ont pas de distorsion radiale. Il existe des solutions directes basées sur 3, 4 ou 6 points mis en correspondance [Wang et al.; 1994]. Cependant les solutions qui produisent les meilleurs résultats restent celles qui utilisent un nombre important de points d'appariement associé à un processus de compensation globale [Horn, 1990]. Dans le cas de l'utilisation d'images avec distorsion (c'est le cas de la plupart des appareils photos), il faut se poser le problème de la correction de l'estimation des paramètres intrinsèques ou internes. Certaines approches prennent le parti de déterminer en même temps les paramètres internes et les paramètres externes de l'acquisition [Hartley, 1997]. Dans les deux cas de figure, une résection spatiale consiste à calculer le modèle géométrique (plaquage entre l'espace 3D et l'image 2D) de la caméra utilisée pour la prise de vue. Le modèle basique de caméra (*pin-hole* ou *modèle sténopé*) considère la projection centrale de points dans l'espace sur un plan appelé *plan d'image* ou plan focal. Sous le modèle de caméra « pin hole », un point dans l'espace est plaqué sur le point sur l'image créé par l'intersection entre la ligne qui relie le *centre optique* de la caméra et le point dans l'espace 3D.

4.2.2.1 La calibration d'une image

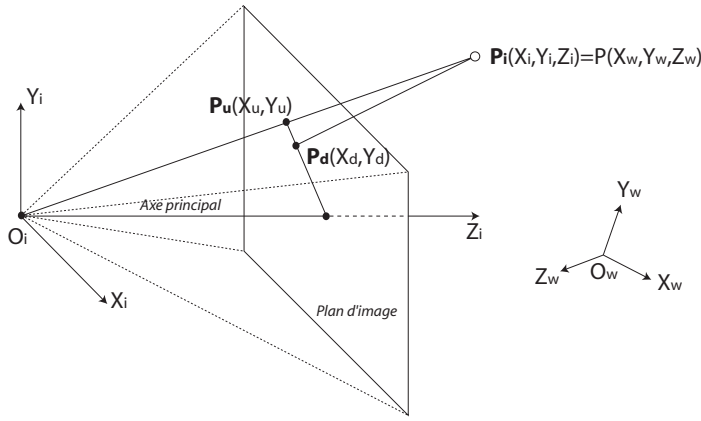
Parmi les recherches développées pour orienter une image sur un ensemble de coordonnées connues dans le domaine de la photogrammétrie [Abdel-Aziz, et al., 1971 ; Hatze, 1988] et de la vision par ordinateur [Faugeras, 1993 ; Fitzgibbon et al., 1998 ; Heikkila et al., 1997 ; Kumar et al., 94], une des méthodes les plus utilisées et celle proposée par [Tsai, 1986]. Son implémentation requiert des correspondances (points) sélectionnées dans l'espace 3D et sur l'image 2D. Cette méthode est basée sur un calcul en deux phases : premièrement on calcule la position et l'orientation, deuxièmement les paramètres internes de la caméra. Dans plusieurs applications qui nécessitent une bonne précision, on considère la caméra déjà calibrée. Cela veut dire que les paramètres internes sont déjà connus (voir section 2.). Dans ce cas, seulement les six paramètres relatifs à la position et à l'orientation doivent être estimés. Nous avons implémenté l'algorithme de Tsai pour le calcul d'orientation des photos. Cet algorithme, pour calculer la *calibration de la caméra*, offre l'avantage d'estimer les paramètres internes et externes séparément. Il s'agit d'une option particulièrement utile car elle donne la possibilité de fixer les paramètres internes de la caméra calculés sur la première image d'un bloc puis de faire seulement l'estimation des paramètres externes des autres images de la même série. Dans le même sens, si l'optique utilisée est fixe, les paramètres internes peuvent être calculés sur une mire avant de démarrer l'acquisition photographique. Le modèle de Tsai est basé sur un modèle de projection perspective (figure 28) et permet d'estimer les onze paramètres suivants :

f - distance focale de la caméra ; k – Coefficient de distorsion radiale de l'objectif,

C_x, C_y – Coordonnées du centre de distorsion radiale ; S_x – Facteur d'échelle pour prendre en considération l'incertitude due aux imperfections en phase de numérisation de l'image;

R_x, R_y, R_z – Angles de rotation pour la transformation entre les coordonnées de l'objet et de la caméra; T_x, T_y, T_z – Composantes de translation pour la transformation entre les coordonnées de l'objet et de la caméra.

La calibration de Tsai consiste en la transformation des coordonnées 3D d'un point (x,y,z)



(en mm) en coordonnées correspondantes (X_f, Y_f) dans l'image (en pixels)¹. Une calibration coplanaire requière que la composante Z des coordonnées 3D soit fixée à 0 et au moins 5 points d'entrée. Tandis qu'une calibration basique non coplanaire requiert au moins 7 points d'entrée. Malgré cela nous avons pu constater qu'une calibration optimisée requiert 11 points minimum pour les

Figure 28. Le modèle de caméra de Tsai.

1. Calibration de Tsai

La transformation des coordonnées du repère objet (X_w, Y_w, Z_w) au repère image (X_i, Y_i, Z_i) considère les paramètres extrinsèques de la caméra (translation T et rotation R) à l'intérieur de l'équation :

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} R = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T$$

Où R et T caractérisent la transformation 3D du système de coordonnées objet à celui de la caméra et sont définies comme suit :

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \text{ avec } \begin{aligned} r_1 &= \cos(R_y) \cos(R_z) \\ r_2 &= \cos(R_z) \sin(R_x) \sin(R_y) - \cos(R_x) \sin(R_z) \\ r_3 &= \sin(R_x) \sin(R_z) + \cos(R_x) \cos(R_z) \sin(R_y) \\ r_4 &= \cos(R_y) \sin(R_z) \\ r_5 &= \sin(R_x) \sin(R_y) \sin(R_z) + \cos(R_x) \cos(R_z) \\ r_6 &= \cos(R_x) \sin(R_y) \sin(R_z) - \cos(R_z) \sin(R_x) \\ r_7 &= -\sin(R_y) \\ r_8 &= \cos(R_y) \sin(R_x) \\ r_9 &= \cos(R_x) \cos(R_y) \end{aligned}$$

La transformation de la position 3D (dans le repère image) au plan d'image est alors calculée au travers des trois étapes suivante :

Transformation des coordonnées objet 3D (X_i, Y_i) aux coordonnées du plan d'image sans distorsions (X_u, Y_u) :

$$X_u = f \frac{X_i}{Z_i} \quad Y_u = f \frac{Y_i}{Z_i}$$

Transformation de coordonnées image sans distorsion (X_u, Y_u) aux coordonnées image avec distorsion (X_d, Y_d) :

$$X_u = X_d(1 + kr^2) \quad Y_u = Y_d(1 + kr^2)$$

où $r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}$, et k est le coefficient de distorsion radiale.

Transformation des coordonnées avec distorsion dans le plan d'image (X_d, Y_d) aux coordonnées de l'image finale (X_f, Y_f) :

$$X_f = \frac{S_x X_d}{d_x} + C_x \quad Y_f = \frac{Y_d}{d_y} + C_y$$

avec (d_x, d_y) : distance entre les éléments du capteur adjacents aux direction X et Y. d_x et d_y sont des paramètres fixes de la caméra. Ils dépendent seulement de la taille du capteur DTC et de la résolution de l'image, (X_f, Y_f) sont la position finale des pixel dans l'image.

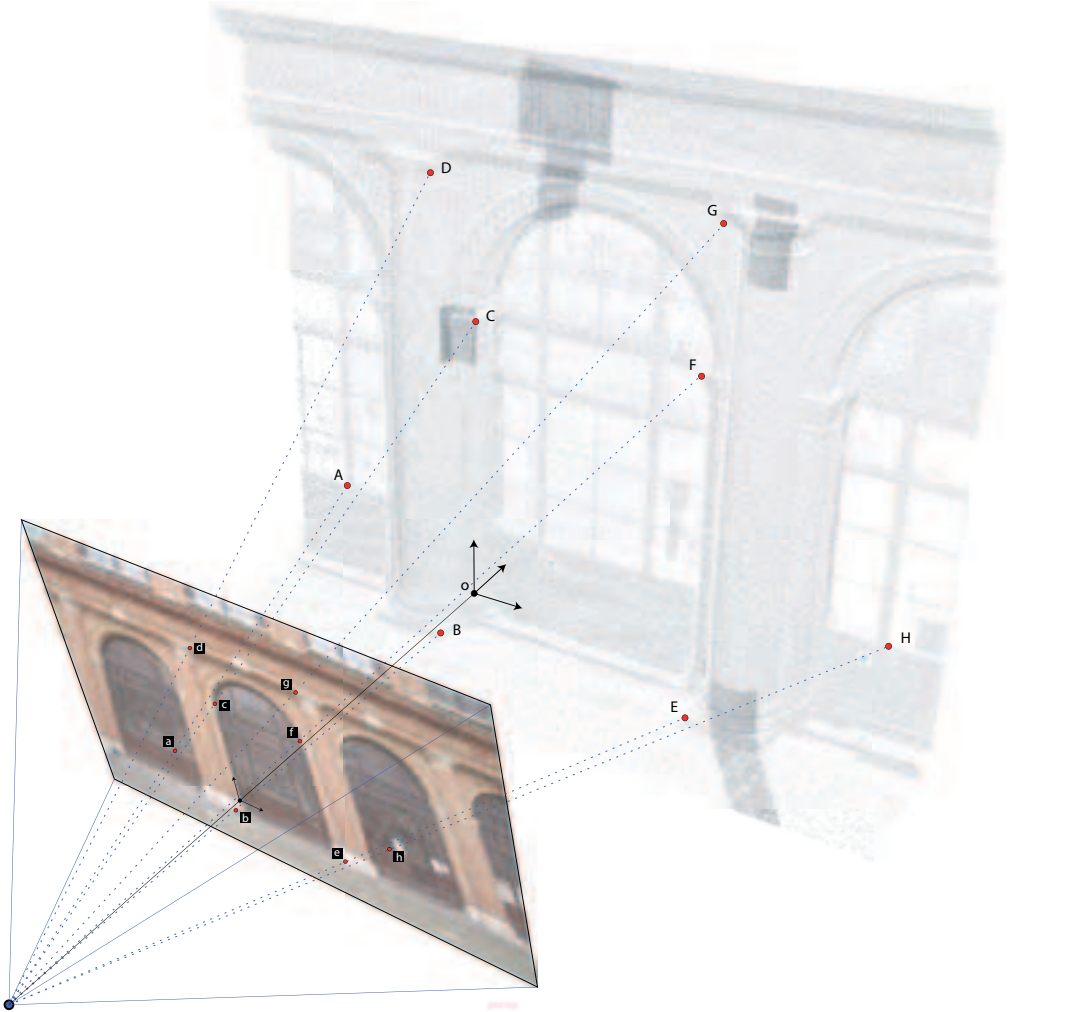


Figure 29. L'orientation d'une photographie sur le nuage de points.

deux modalités. D'autres considérations autour de la qualité de la calibration concernent la stratégie de saisie des correspondances : les points choisis doivent en effet être distribués largement dans le champ visuel de la caméra et couvrir toute la gamme de profondeur présente sur l'image (ou dans la géométrie que l'on veut restituer).

Du point de vue de l'implémentation nous procédons comme suit :

- Une interface développée en MEL permet de sélectionner des coordonnées 3D sur le nuage (en utilisant une modalité de *snap*) et de leur associer les coordonnées 2D correspondantes sélectionnées sur l'image ;
- La liste des correspondances sélectionnées est enregistrée dans un fichier temporaire selon une structure prédéfinie ;
- Une application développée en C++ (implémentation de l'algorithme de Tsai²) est alors exécutée pour calculer le modèle géométrique de la caméra à partir des données d'entrées enregistrées dans un fichier temporaire ;
- Un script MEL récupère enfin les résultats de la calibration et génère un modèle géométrique de caméra dans la scène en lui assignant les paramètres calculés ainsi qu'un plan d'image configuré par rapport aux dimensions de la photographie.

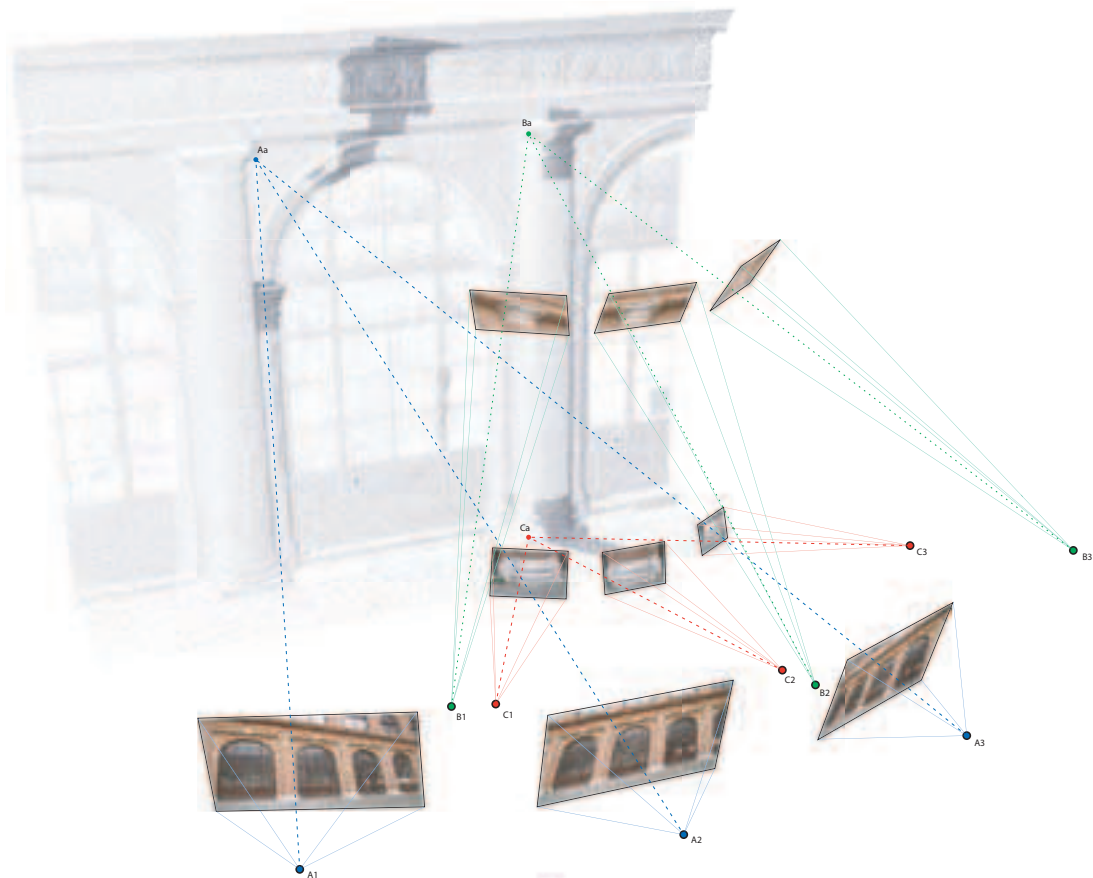


Figure 30. Orientation de 3 blocs d'images sur le nuage de points.

2. Implémentation de l'algorithme de Tsai élaborée à partir du code source développé par Reg Willson. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/user/rgw/www/index.html>.

Le modèle géométrique ainsi créé dans la scène permet d'évaluer les résultats de la superposition image/nuage. Dans nos tests nous utilisons des images sur lesquelles nous appliquons une correction de la distorsion³ avant de les orienter sur le nuage de points. Cette opération préalable est nécessaire à cause des limitations du nœud plan d'image en MEL. En effet, ce nœud ne prévoit pas la prise en compte de la distorsion, il projette directement les éléments de la scène 3D sur un plan. La figure 30 montre trois blocs de photographies orientés sur le nuage de points.

Dans le but de prévoir l'utilisation d'autres solutions (plus robustes) pour l'orientation des photographies sur le nuage de points, nous avons prévu une interface pour l'introduction manuelle des valeurs d'orientation calculées par des logiciels commerciaux. Cela requiert qu'un repère commun soit fixé sur trois points sélectionnés sur le nuage de points et sur les images du bloc. Une perspective de développement intéressante pourrait par exemple concerner la lecture automatique de fichiers (XML) créés par le logiciel *ImageModeler* produit par la société Realviz. Ceci permettrait d'intégrer à notre système des blocs d'images préalablement calibrés.

4.2.3 L'extraction de coordonnées additionnelles

Les avantages offerts par la fusion de données résident en premier lieu dans la possibilité d'ajouter des acquisitions photographiques effectuées lors de campagnes de relevé successives ainsi que dans le fait de pouvoir exploiter des images des campagnes précédentes. En second lieu, l'orientation du bloc d'images sur le nuage de points permet d'extraire des coordonnées additionnelles pour couvrir les zones d'ombre ou ajouter de l'information métrique au nuage de points issu d'un balayage laser.

Pour cela, on exploite les relations entre deux modèles géométriques (géométrie épipolaire) de caméras dans la scène 3D. Les deux vues peuvent être acquises simultanément (configuration stéréo) ou de façon indépendante (bloc multi-images). Ces deux situations sont en effet équivalentes du point de vue géométrique car à chaque vue correspond une matrice de caméra. Pour la saisie de coordonnées additionnelles, nous exploitons la géométrie épipolaire (géométrie projective intrinsèque entre deux vues [Hartley, 2003]). Cette relation est indépendante de la structure de la scène car elle dépend seulement des paramètres internes des caméras et de leur position et orientation relatives. Pour cela on suppose que l'on connaît seulement une des deux projection d'un point (projection sélectionnée sur le plan d'image de la première caméra). Le plan épipolaire est déterminé par la ligne de base entre les deux centres optiques et le rayon défini par la première projection du point. Le rayon correspondant à la seconde projection (inconnue) se relie avec la première dans le plan épipolaire. La ligne représentant le premier rayon (entre la 1^{ère} caméra et la 1^{ère} projection) est alors projetée dans la deuxième image. Il s'agit de la ligne épipolaire correspondant à l'épipole sélectionné dans la première image (figure 31).

Du point de vue de l'implémentation nous avons développé une procédure en trois étapes :

- Une interface permet d'abord de choisir deux images orientées sur le nuage de points ;
- Après avoir sélectionné un point sur la première image, on récupère sa position dans

3. La correction de la distorsion est élaborée par l'application gratuite PTLens.

l'espace : le point sélectionné est en effet contraint par rapport au plan d'image de la caméra ;

- Une ligne (courbes B-spline de 1^{er} degré) est alors créée et définie par deux points de contrôle. Le premier sur les coordonnées spatiales du point sélectionné, le second projeté à l'infini selon une orientation calculée en fonction du centre optique de la caméra ;
- Une commande MEL permet ensuite de contraindre le curseur sur la courbe créée ;
- L'utilisateur peut alors sélectionner le point de correspondance sur la deuxième image.

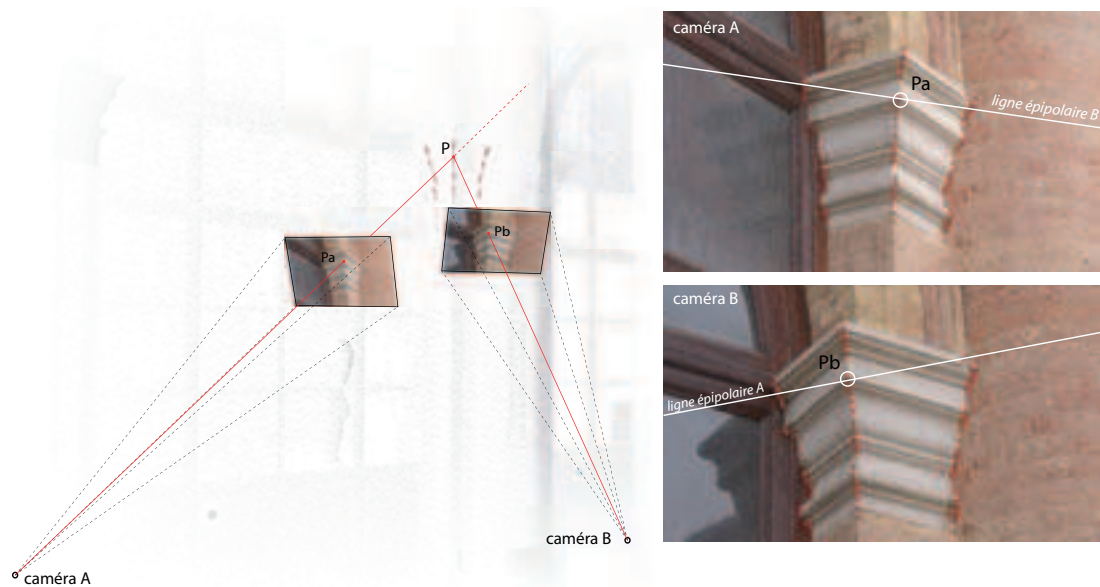


Figure 31. Extraction de coordonnées additionnelles à partir d'un couple d'images orientées sur le nuage de points.

Cette procédure est complètement manuelle ; cela présente l'avantage de pouvoir choisir avec attention des points pertinents dans la scène. Une perspective intéressante concerne par contre la prise en compte des techniques de corrélation automatique de points.

4.3 Extraction d'informations pertinentes

La forme la plus simple d'extraction d'informations pertinentes à partir d'un nuage de points systématique est la sélection d'un point. La librairie de fonctions MEL pour la sélection fournit déjà plusieurs solutions pour cette tâche. Chaque point d'un système de particule (représentation du nuage de points dans notre système) peut en effet être sélectionné de façon à être substitué par une entité géométrique (locator, symbole, etc.). Un des avantages offerts par la fusion des données est la possibilité de sélectionner un point en regardant au travers de la caméra associée à une photographie. Une commande pour le contrôle de l'opacité du plan d'image de la caméra a été développée pour rendre cette opération plus ergonomique. Cet outil permet une collecte plus facile des sommets caractéristiques exploitables par des procédures de reconstruction basées sur des représentations par frontières (triangles, quadrangles, primitives géométriques déformables, etc). En revanche, pour la reconstruction de surfaces plus complexes, des

ensembles de coordonnées définissant les profils caractéristiques de l'objet sont à rechercher dans le nuage de points.

Nous avons développé trois outils pour l'extraction de profils pertinents. Le premier utilise un plan en intersection avec le nuage de points. Le second exploite la rectification d'images, le troisième est un outil résultant de l'intégration des deux premiers. Comme on le verra dans les sections qui suivent, les profils extraits du nuage de points sont utilisés pour générer des surfaces à l'aide des fonctions de modélisation géométrique.

4.3.1 Extraction de profils au travers d'un plan d'intersection

L'intersection du nuage de points avec un plan judicieusement choisi permet d'extraire des ensembles de points décrivant les profils caractéristiques d'éléments architecturaux. En nous inspirant d'outils déjà implémentés dans des solutions commerciales, nous avons développé un outil pour la manipulation en temps réel d'un plan en intersection avec le nuage de points. Ce plan est composé d'une entité géométrique visible dans l'espace et d'une caméra à projection orthogonale qui lui est associée. Dans une fenêtre distincte, le plan d'intersection (observé en

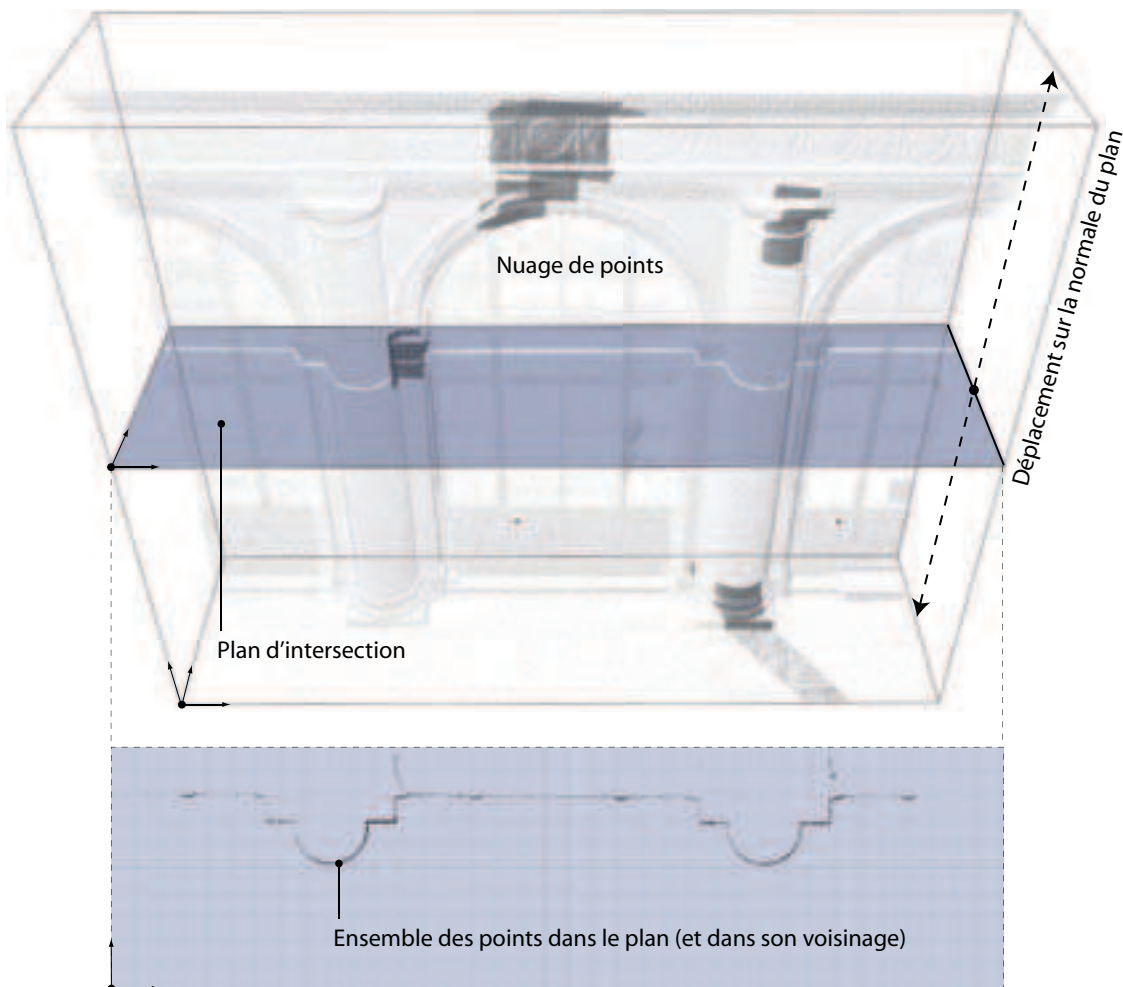


Figure 32. Extraction de profils par la manipulation d'un plan en intersection avec le nuage de points.

projection orthogonale) constitue le support pour le tracé des profils, tandis que le contrôle de la profondeur du champ de vision de la caméra associée assure l’affichage des seuls points du nuage à une tolérance près (notion de plan épais) avec le plan (figure 32). Pour l’adaptation automatique du plan d’intersection au nuage de points sélectionné, une procédure calcule et transforme les dimensions du plan en fonction des dimensions de la boîte englobante du nuage et d’une orientation choisie. L’orientation peut être définie par rapport aux axes du repère global (espace) ou du repère locale du nuage (objet), à partir de trois points sélectionnés sur le nuage ou par une la rotation libre dans l’espace. La phase de reconstruction manuelle des profils utilise des fonctions MEL pour le tracé de courbes B-splines de degré 1 ou 3. En exploitant la projection orthogonale de la caméra, les entités dessinées sont automatiquement projetées sur le plan d’intersection. Une fois la courbe retracée, d’autres fonctions permettent de simplifier le profil créé. Ceci est nécessaire pour garantir l’uniformité des surfaces résultantes des procédures de modélisation utilisant les profils extraits (section 5.2.1). Ces procédures sont basées sur la commande MEL *rebuiltCurve* qui reconstruit une courbe en modifiant son paramétrage. Différentes options de la fonction permettent un re-paramétrage uniforme, une réduction/redistribution des points de contrôle en fonction d’une distance de référence ou de l’allure de la courbe.

4.3.2 Extraction de profils à partir d’une image rectifiée

Les relations projectives entre les points de l’espace-objet et les points sur l’image peuvent être exploitée aussi pour la rectification d’image. Comme nous l’avons décrit dans la première partie de l’état de l’art, la rectification de photographies s’appuie sur la définition d’un plan de projection et déforme l’image par une équation d’homographie. À l’exclusion des distorsions de l’objectif, cette transformation peut être vue comme le plaquage perspectif d’une image, dont on connaît l’orientation, sur un plan défini dans l’espace.

La procédure consiste en 4 étapes principales (figure 33) :

Définition du plan de rectification. Pour l’orientation du plan de rectification dans l’espace on récupère la position de trois points sélectionnés sur le nuage de points (figure 33a) ou sur des coordonnées additionnelles extraites à partir des images. En alternative, on procède par un positionnement interactif du plan en utilisant les commandes de transformation simples (translation, orientation et changement d’échelle).

Création d’une caméra à projection orthogonale. Une fois l’orientation du plan de rectification définie, on génère une caméra à projection orthogonale et on connecte les attributs de rotation des deux entités afin de le faire coïncider dans l’espace. Cette caméra permet d’observer le nuage de points en fonction de l’orientation du plan de rectification (figure 33b).

Sélection de la zone de rectification. Une fois sélectionnée une photographie source pour la rectification (image orientée sur le nuage de points), on trace un rectangle définissant la zone de rectification (figure 33c).

Génération de la rectification. Une entité géométrique (polyPlane) est générée en projetant parallèlement les extrémités du rectangle du plan d’image de la caméra orthogonale au plan de rectification. Finalement on extrait la portion sélectionnée de l’image source (coordonnées uv des extrémités du rectangle) et on la plaque comme texture sur le plan de rectification (figure 33d).

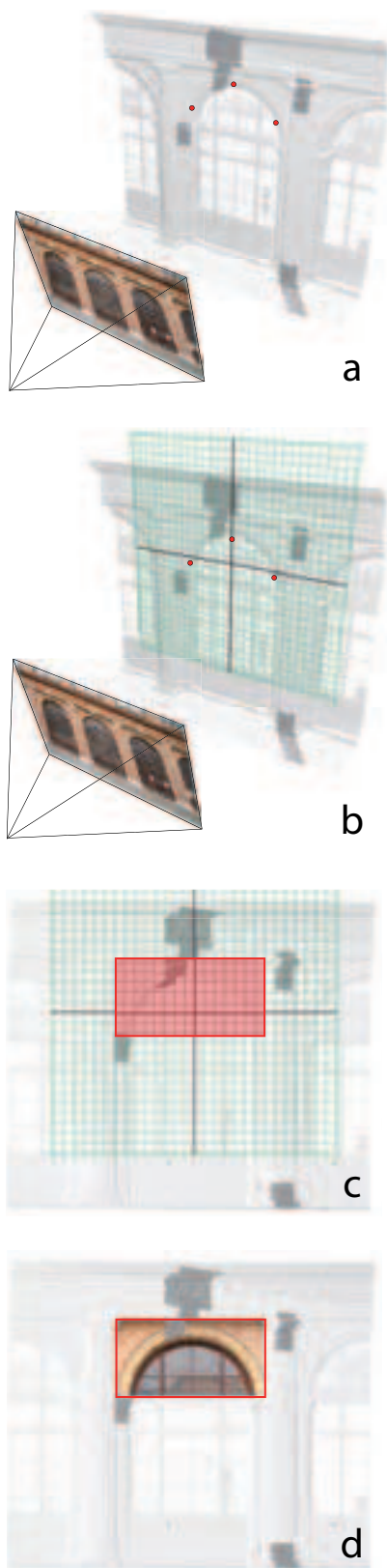


Figure 33. Séquence d'opération de la procédure de rectification d'image.

Le support ainsi créé (plan de rectification + caméra associée) peut être exploité pour la construction de tracées (lignes, profils, etc.). Par rapport aux procédures plus complètes pour l'élaboration de mosaïques d'images rectifiées, ce processus est exploitable exclusivement pour le tracé d'entités bidimensionnelles en zones spécifiques extraites à partir d'une seule photographie. Comme dans le cas de l'intersection, l'extraction de profils à partir d'une image rectifiée exploite le positionnement et l'orientation d'un plan à l'intérieur du nuage de points. Ce plan (photographie redressée) sert de support pour tracer des contours des objets distingués sur une image. À la différence du nuage de points, la photographie permet en effet de mieux interpréter les discontinuités qui caractérisent les surfaces présentes sur la scène. Une fois défini un plan de rectification l'utilisateur peut tracer des entités bidimensionnelles directement sur la photographie. Une voie d'approfondissement que nous proposons d'explorer dans le futur concerne l'implémentation d'algorithmes d'analyse d'image pour la détection automatique des contours.

4.3.3 Extraction de profils sur un support mixte (plan d'intersection/image rectifiée)

En exploitant la relation spatiale entre les caméras et les nuages de points obtenues au travers de la résection spatiale, nous avons conçu un outil pour l'extraction de profils qui intègre les deux outils décrits précédemment. La conception de l'outil est issue du constat que le plan d'intersection peut aussi être considéré comme un plan de rectification d'image. Or la difficulté la plus importante pour le développement de cet outil concerne l'exigence de manipuler (translation et orientation) le plan d'intersection dans l'espace pour retrouver les profils à extraire. Si l'on veut lui associer l'image, cela nécessite d'effectuer le calcul de rectification d'image en temps réel. Pour résoudre ce problème, nous exploitons une propriété fondamentale de l'environnement de programmation que nous utilisons : le *Dependency Graph*. Le DG est le noyau central qui contrôle toute entité graphique utilisée par le système sous forme d'un flux de données. Nous réalisons le mélange entre le plan d'intersection et le plan de rectification par une connexion d'attributs dynamique dans un réseau de nœuds.

4.3.3.1 Le réseau de nœuds

L'affichage en temps réel de l'image rectifiée est fait par l'assignation d'un nœud matériau au plan d'intersection. Ce matériau hérite des attributs d'un réseau de nœuds organisés dans un graphe (figure 34). Nous organisons des relations entre six nœuds distincts :

Texture source. Ce nœud permet d'utiliser une image comme texture. L'attribut qui définit l'image d'entrée est une chaîne de caractères qui identifie le chemin vers le fichier image.

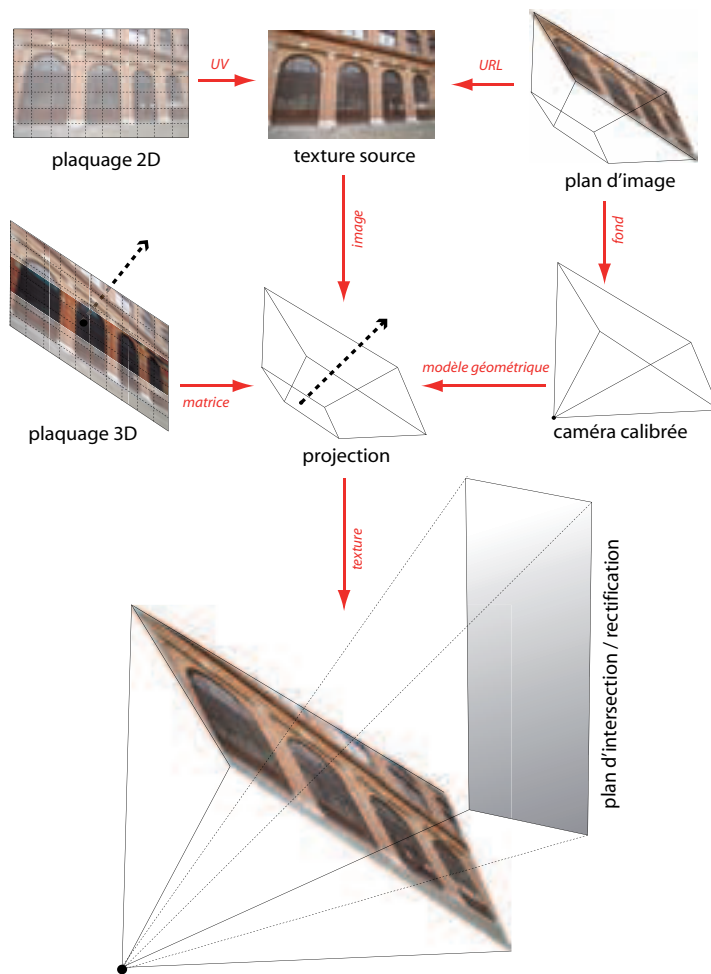


Figure 34. Le réseau de nœuds développé pour la rectification d'image en temps réel.

Plaquer bidimensionnel. Il s'agit d'un nœud qui contrôle la manière dont une texture est plaquée sur un plan. Ce nœud définit une *frame-texture*, une aire rectangulaire sur le plan (dans l'espace de coordonnées uv) dans laquelle la texture est affichée. Des attributs permettent de contrôler la position, la taille et l'orientation de la texture sur ce plan.

Plaquer tridimensionnel. Il s'agit d'un nœud qui calcule la transformation d'un point (ou des points d'une surface) dans l'espace en le multipliant par une matrice inverse d'une source de projection. Il est utilisé pour établir les relations projectives entre un point ou une aire sur l'image et un point ou une surface dans l'espace.

Plan d'image. Ce nœud est une entité qui permet d'afficher une image dans l'espace 3D. Il est toujours associé à une caméra et constitue le fond de la scène observée au travers d'une caméra.

Caméra à projection perspective. Il s'agit du modèle géométrique de la caméra orientée sur le nuage de points. Les attributs que l'on exploite sont les paramètres d'orientation externe, la distance focale et les proportions de l'image (rapport ratio).

Projection. Ce nœud permet de transformer une image bidimensionnelle en un plaquer tridimensionnel en utilisant différents types de projection. Ce nœud peut contrôler une projection de type planaire, sphérique, cylindrique, cubique, tri-planaire, concentrique et perspective.

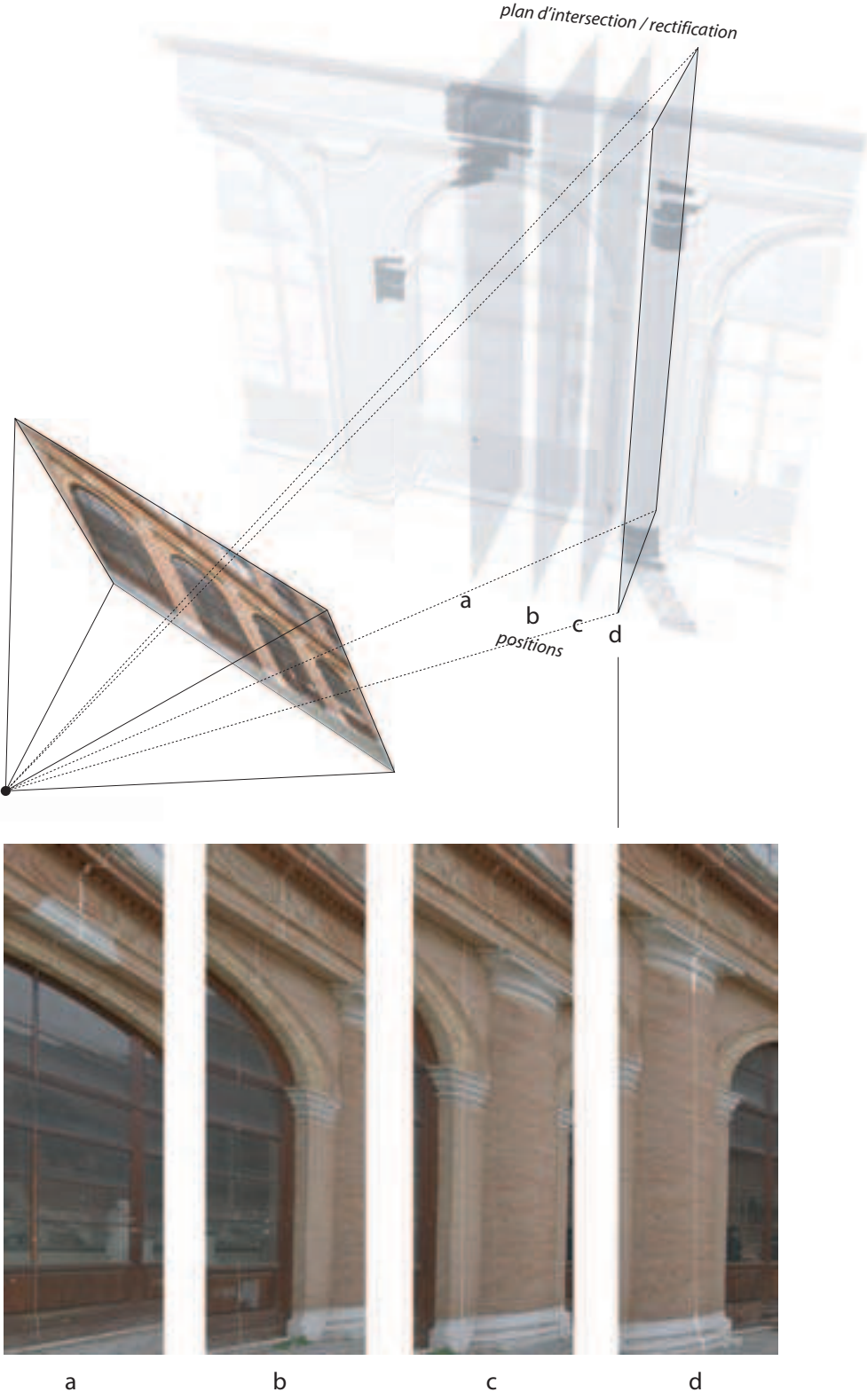


Figure 35. L'extraction de profils sur un support mixte (plan d'intersection/rectification).

4.3.3.2 La connexion d'attributs dynamiques

Le mélange de l'image rectifiée avec le plan d'intersection résulte du flux de données établie dans le réseau des nœuds que l'on vient de décrire connectés par des attributs dynamiques. La projection de l'image calibrée sur le plan de rectification est obtenue par l'assignation au plan du nœud «matériau» qui hérite de l'attribut *color* (couleur de chaque point dans l'espace) du nœud de projection. Ce dernier hérite de trois attributs différents des autres nœuds du graphe :

L'attribut *linkedCamera* qui contient les paramètres du modèle géométrique de la caméra calibrée du nœud «caméra à projection perspective».

L'attribut *image* par conversion de l'attribut *outcolor* du nœud 'texture source'.

L'attribut *placementMatrix* du nœud «plaquage tridimensionnel». Deux dernières connexions relient l'attribut *imagePlane* du nœud «caméra» au parcours vers le fichier image stocké dans le nœud «texture source» et l'attribut (u,v) du nœud «plaquage bidimensionnel» aux *coordonnéesUV* du nœud 'texture source'.

Grâce au réseau de nœuds que l'on vient de décrire, la transformation du plan d'intersection (translation, rotation, échelle) dans l'espace provoque la mise à jour continue de la texture plaquée (figure 35). Les attributs connectés dans le réseau sont en effet modifiés en temps réel. De plus, la connexion entre les nœuds «plan d'image» et «texture source» permet de choisir une photographie (avec la caméra associée) la plus appropriée à l'orientation du plan d'intersection choisie. Une réflexion plus approfondie sur la sélection automatique de la photographie à rectifier en fonction de la position et de l'orientation du plan d'intersection pourra être menée par l'étude des techniques de plaquage de textures dépendant du point de vue que nous avons décrites dans l'état de l'art (section 2.3.2).

4.4 Conclusions

En conclusion, nous pensons que la consolidation hybride est une solution efficace pour l'enregistrement exhaustif des informations dimensionnelles d'un objet complexe tel qu'un bâtiment. Le problème initial consiste essentiellement à disposer d'un nuage de points avec une densité de points suffisante pour identifier des correspondances permettant d'orienter les photographies. Dans ce sens, la vitesse d'obturation d'un appareil photo permet d'effectuer les acquisitions à partir d'un point de vue mobile. Différents vecteurs mobiles (ballons captifs, hélicoptères radiocommandés, UAV⁴, etc.) avec un contrôle au sol de la prise de vue peuvent alors servir de moyen pour collecter des informations aux endroits où les occlusions rendent l'accès impossible aux systèmes d'acquisition terrestre.

4. UAV. Unmanned Aerial Vehicle.

5. Approche proposée pour la reconstruction de la morphologie de l'édifice

5.1 Introduction

Sans tenir compte des caractéristiques spécifiques à une période historique ou à un courant stylistique, dans l'observation d'un édifice, nous identifions en premier deux échelles fondamentales : celle des éléments architectoniques et celle des décors. Au-delà de la taille des éléments, l'identification des leurs différents niveaux de complexité géométrique est un aspect beaucoup plus important dans un problème de reconstruction. Comme nous l'avons vu précédemment, la phase d'acquisition de données spatiales de notre approche prend déjà en compte cette division. Dans ce chapitre, nous présentons une approche et des outils que nous avons développés pour la reconstruction tridimensionnelle d'édifices architecturaux. Nous nous intéressons essentiellement à la reconstruction d'éléments qui caractérisent le bâti. On distingue alors, les éléments de sa structure (piliers, murs, couvertures, etc.), les éléments typés de sa composition (piédestaux, colonnes, arcs, etc.) et les éléments qui ornent ses surfaces (bas-reliefs, hauts-reliefs, décors peints, etc.). On ne traitera pas le problème de la reconstruction des sculptures car cette problématique fait déjà l'objet de plusieurs recherches abouties [Levoy, 1999] et parce que des procédures efficaces pour la reconstruction par maillage automatique sont déjà disponibles dans différentes solutions commerciales¹.

Notre démarche s'appuie sur un constat : la représentation analytique d'un objet d'architecture doit s'appuyer sur l'interprétation des éléments qui le composent au travers de l'exploitation de connaissances spécifiques. Pour donner un exemple on peut citer la représentation géométrique du fût d'une colonne. Cet élément, loin d'être un simple cylindre, est caractérisé par une allure (tronconique, galbé du bas, galbé du tiers, ou renflée) et des transitions comme *l'apophyge* (moulure adoucissant la rencontre du fut avec la base ou avec le chapiteau) ou *l'astragale* (corps de moulures séparant le chapiteau du fût). De plus, des proportions règlent ses dimensions [Forssman, 1978]. Ce type d'observation peut être fait pour presque toutes les parties d'un édifice. Seulement dans le cas où la géométrie de l'objet serait plus complexe (décors, sculptures, etc.), une lecture sémantique aussi structurée n'est plus toujours possible et les techniques de reconstruction par maillage automatique peuvent alors être envisagées.

En fonction de la catégorie à laquelle l'élément à reconstruire appartient, la démarche de reconstruction peut être de trois types différents :

- Restitution à partir de profils pertinents. Cette démarche exploite une collection d'outils optimisés pour la reconstruction manuelle d'objets à partir de l'identification de quelques profils pertinents (section 5.2) ;

1. *Rapidform*, <http://www.rapidform.com>; *Paraform*, <http://www.metris.com>

- Restitution par primitives architecturales. Dans ce cas on utilise une librairie de primitives préalablement formalisées, qui peuvent être instanciées (dimensionnées et positionnées) dans le nuage de points 3D de façon semi-automatique (section 5.3) ;
- Restitution d'éléments de décors. Il s'agit d'une reconstruction tridimensionnelle automatique des bas-reliefs à partir d'un nuage de points suffisamment dense (section 5.4).

Dans ce chapitre nous présentons ces trois cas de figure, en décrivant d'abord les aspects méthodologiques et ensuite l'implémentation informatique des méthodes.

5.2 Reconstruction des surfaces à partir d'informations pertinentes

Dans un relevé, la logique à la base de l'extraction d'informations pertinentes est strictement liée à la complexité morphologique des objets que l'on veut reconstruire. Une réflexion est alors indispensable à propos de l'état de conservation des matériaux qui les composent. Plus l'état actuel de l'édifice est loin de son modèle d'origine (à cause de transformations causées par différents facteurs), plus le nombre d'informations nécessaires à la description de ces éléments est élevé. Dans une échelle qui va de la ruine à l'édifice intact, on peut distinguer trois niveaux principaux.

Au premier niveau on trouve les édifices qui présentent un désordre évident où la nature géométrique des éléments est partiellement ou complètement invisible. En prenant l'exemple d'un mur, c'est le cas d'un bouffement (déformation d'un mur dont le parement se détache de la masse) ou d'une brèche (ouverture créée accidentellement dans un mur). À ce niveau, le nombre d'informations nécessaires à sa description est presque aussi élevé que le nombre de points saisis. On parle alors de reconstruction du modèle « tel que saisie ». Pour ce cas, il est envisageable d'utiliser des procédures de maillage automatique qui permettent de reproduire avec une bonne précision l'état de conservation des éléments.

Le deuxième niveau concerne les éléments qui présentent des déformations importantes ou des parties manquantes concentrées dans certaines zones de l'élément. L'extraction des profils devra s'intéresser dans ce cas non seulement à la description de l'objet, mais aussi à la restitution de ces altérations. Une séquence de profils équidistants et la segmentation sélective des parties altérées pourront alors s'ajouter aux profils de base.

Le troisième niveau concerne les éléments qui expriment (sauf quelques imperfections ou dégradation) les règles de composition à la base de leur conception. Il s'agit d'éléments qui conservent (ou sur lesquels a été reconstruit) leur état originel. Dans le but de pouvoir exploiter la description sémantique d'édifices architecturaux, nous allons concentrer notre attention sur ce dernier cas de figure. D'ailleurs, l'interprétation de l'édifice basée sur les connaissances architecturales permet ensuite d'appliquer les mêmes démarches pour supporter le développement d'hypothèses de restitution en présence de vestiges.

5.2.1 Génération de surfaces à partir de profils

L'application de la géométrie à la description et à l'analyse de la forme architecturale, oblige à réduire la multiplicité à l'intelligibilité. Des exemples de cette approche peuvent être retrouvés dans différents domaines et appliqué à la compréhension géométrique de formes ou de phénomènes variés. Par exemple [D'Arcy Thompson, 1994] essaie de ramener la variété infinie des formes naturelles à un schéma général, qui soit en mesure de traduire le

visible qualitatif en un invisible quantitatif. Les connaissances relatives à la représentation géométrique des objets architecturaux offrent alors un support privilégié pour l'identification de méthodes de reconstruction de surfaces à partir de profils. À partir d'une analyse géométrique des différentes parties d'un édifice et en ayant comme objectif sa description sémantique, nous proposons une méthode pour la reconstruction géométrique à partir de profils. Cette méthode est fondée sur l'analyse des invariants et des spécificités morphologiques que l'on peut extraire d'un découpage sémantique du bâti. Pour chaque catégorie d'éléments, nous identifions les informations pertinentes à sa description géométrique, la technique la plus adaptée à leur extraction et une chaîne de procédures pour la génération des surfaces. La démarche de reconstruction est organisée autour de quatre concepts clés : la surface dominante, la transition, le plan de construction et la répétition.

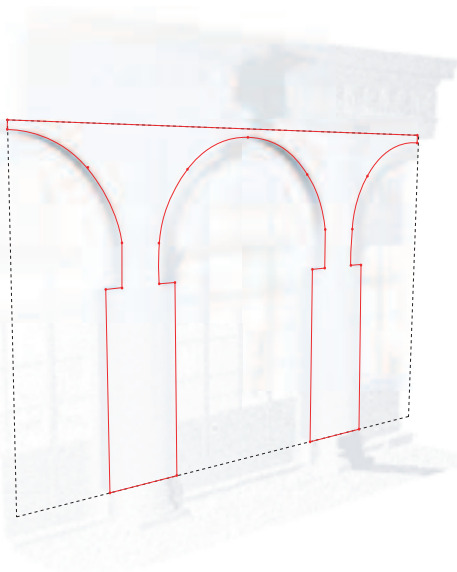


Figure 36. Reconstruction d'une surface dominante.

on peut distinguer : le *nu* (surface plane), le *solin* (partie inférieure formée d'une assise ou de plusieurs d'assises), l'*épattement* (superépaisseur d'un mur dans sa partie inférieure), la *chantepleure* (ouverture étroite percée dans un mur), le *lamier* (membre horizontal en saillie sur le nu du mur), la *tête* (extrémité du mur) et le *chaperon* (couronnement du faîte d'un mur isolé). La restitution géométrique de ces caractères peut s'appuyer sur l'expression des transitions entre deux plans ou sur l'addition / soustraction de volumes.

Le contour. Il s'agit du profil définissant les frontières de la surface dominante (figure 36). Il peut décrire les limites de l'extension spatiale de l'édifice, aussi bien que les baies qui s'articulent à son intérieur. Dans ce cas, il s'agit donc de restituer la structure principale sur laquelle les éléments de la composition se détachent. Les profils décrivant le contour d'une surface dominante peuvent être extraits à partir d'un plan de rectification d'image ou d'une combinaison de plans d'intersection.

L'assemblage. Les surfaces dominantes résultent souvent d'un assemblage de petits éléments. Par exemple les sols sont des aires de pierres, de briques, de carreaux en céramique posés sur une couche de support d'isolement. Ces assemblages correspondent à différentes techniques de composition : pour le sols on distingue par exemple le *pavage* (blocs généralement cubiques), le *dallage* (en grande plaques carrées ou rectangulaires), le *carrelage* (plaques carrées,

rectangulaires, hexagonales, etc.) et la *mosaïque* (petits éléments de couleur différentes en compositions décoratives ou figurées). Des exemples analogues peuvent être trouvés à propos de l'appareillage des murs. En ce qui concerne la restitution de ces éléments, sauf des cas rares, le seul nuage de points issu d'un scanner laser est insuffisant. Dans ce cas, la richesse informationnelle d'une image offre un support beaucoup plus adéquat à la restitution.

5.2.1.2 La transition

L'organisation des éléments qui composent un édifice s'appuie sur des transitions géométriques. Les profils partagés par deux éléments sont alors à distinguer dans la composition générale. Dans le cas spécifique de la reconstruction 3D, le problème consiste en identifier les transitions entre les éléments tout au long d'une direction dominante (figure 37). Les transitions entre les surfaces en architecture sont en général caractérisées par des discontinuités à 90 degrés ou par des transitions concaves ou convexes. Pour la reconstruction on s'appuie alors sur une logique de division de la forme en un ensemble de profils et on génère les transitions par des fonctions de modélisation par traçage à deux frontières. Deux ou plusieurs profils sont alors à extraire pour restituer les transitions. Dans ce sens, la photographie est un support fondamental car, dans la plupart des cas, ces séparations sont visibles exclusivement par une variation de texture.

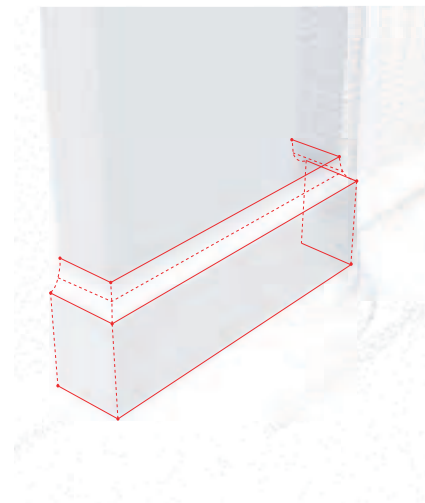


Figure 37. La reconstruction d'une transition.

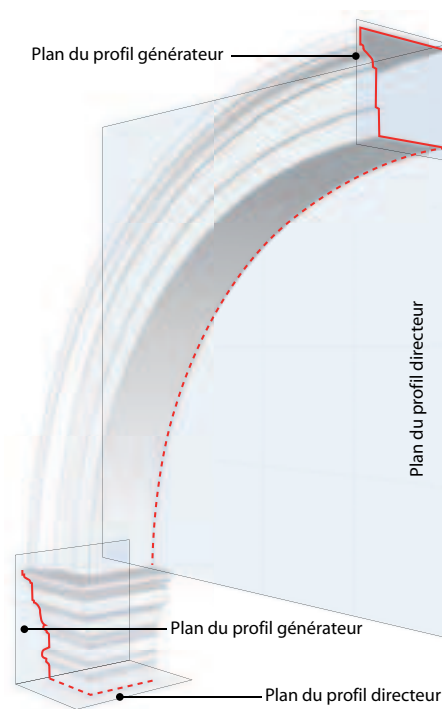


Figure 38. La reconstruction par plans de construction.

5.2.1.3 Les plans de construction

Pour [Quintrand et al., 1985] bien que les objets manipulés par les architectes durant les siècles soient essentiellement tridimensionnels, la pratique figurative en conception a toujours pour support le plan. Les profils extraits à partir de plans pertinents (figure 38) constituent les descripteurs des surfaces qui peuvent être générées par des fonctions de modélisation classiques (balayage, extrusion, interpolation, etc.). Les profils extraits peuvent décrire les frontières des objets aussi bien que les profils à la base de leur conception. Cette phase d'interprétation est donc la plus importante pour la compréhension de la nature géométrique des éléments qui composent l'édifice. Les connaissances relatives à la représentation architecturale entrent alors en jeu. Nous avons vu que tout au long de l'histoire de l'architecture, la complexité morphologique des formes a toujours été contrainte aux méthodes de contrôle géométrique qui ont permis de les concevoir. Des exemples de

ces méthodes sont la géométrie descriptive [Monge, 1799], la stéréotomie [Desargues, 1640; Vallée, 1853]. À partir d'une étude des principes sous-jacents à ces méthodes de contrôle de la forme architecturale, on peut alors identifier d'un côté les informations pertinentes à extraire du nuage de points et ensuite le processus de construction le plus adapté pour assurer la restitution géométrique des éléments.

5.2.1.4 La répétition

La composition d'un grand nombre d'édifices architecturaux s'appuie sur la distribution d'éléments répétés dans l'espace. Ces éléments sont souvent organisés autour de tracés géométriques : la symétrie, le rythme ou d'autres règles de composition peuvent par exemple organiser des éléments typés tout au long d'une direction dominante. De plus, ces répétitions peuvent intéresser différentes échelles : les relations hiérarchiques que la composition architecturale exprime organisent les éléments typés autour des notions d'ordre, de module, d'étage, ou de façade. Il est donc essentiel d'extraire des données relevées une décomposition capable de décrire les relations entre les éléments appartenant aux différentes échelles et les règles qui assurent leur connexion. En ce qui concerne le langage classique cette organisation résulte des principes fondamentaux de la composition architecturale [Wittkover, 1998]. Dans ce sens, les fonctions de groupement d'éléments peuvent aider par rapport à deux buts distincts : le premier concerne la description sémantique de l'édifice (dont on parlera de façon approfondie dans le chapitre 6), le second concerne la possibilité de réutiliser la géométrie restituée d'un élément pour l'instancier sur les autres éléments du même type.



Figure 39. Éléments moulurés (en noir) dans un module de l'édifice examiné.

5.2.1.5 La mouluration

Toujours dans la problématique de répétition d'éléments mais à une échelle différente, il est nécessaire de s'intéresser à l'analyse des éléments moulurés (figure 39). La plupart des éléments du langage classique s'appuient en effet sur le concept de mouluration : l'utilisation d'un ensemble d'unités atomiques exploitées en combinaison mécanique pour composer les profils puis les surfaces. Comprendre le rôle que les moulures jouent dans la forme des éléments d'architecture classique est essentiel [Ungers, 1994]. Premièrement, cela permet de reconstruire des profils en les comparant avec un langage de description géométrique qui appartient à la représentation architecturale ; deuxièmement cela permet de décrire l'édifice comme une collection d'objets identifiés par un vocabulaire précis. Finalement cela permet de mieux interpréter les données du relevé et d'éviter de produire des profils qui n'ont pas de sens du point de vue de l'analyse architecturale. Pour traiter de manière pertinente la restitution des parties moulurées, il est maintenant nécessaire d'approfondir les aspects concernant le rôle des connaissances architecturales dans l'interprétation de la forme.

5.3 Outils de modélisation basés sur les connaissances architecturales

5.3.1 Introduction

Dans la section précédente, nous avons expliqué que l'analyse de la forme peut être conduite par l'identification du processus permettant sa construction géométrique. En effet l'utilisation du dessin va au-delà du simple travail de transcription passive d'une réalité donnée, car le dessin, en architecture, est avant tout un outil d'analyse, de conceptualisation et finalement de projection. [Lichtenstein, 1989] a montré que, depuis l'âge classique au moins, « ... le dessin est toujours défini comme une représentation abstraite et dont l'origine réside uniquement dans la pensée, la marque d'une activité intellectuelle qui prouve que celle-ci obéit toujours à l'ordre d'un dessein, c'est-à-dire un projet ... ». Or, les codes de la représentation architecturale peuvent toujours aider dans cette tâche qui reste la plus difficile de la phase de reconstruction d'un édifice. Par conséquent, le rôle que les connaissances architecturales peuvent jouer dans la conception d'outils qui exploitent ce savoir devient évident.

Une des lignes de recherche qui concerne le rapport entre géométrie et architecture est celle relative au dessin des ordres classiques. Cette étude est évidemment nécessaire tant à l'histoire qu'au dessin de l'architecture. Le dessin de l'ordre, c'est-à-dire la modélisation et le proportionnement de ces parties dans l'ensemble est encore actuel pour la recherche scientifique : l'étude de la forme comme guide pour les procédures de relevé. L'étude de la forme a une double finalité : la première est celle qui conduit à la représentation, la seconde est celle qui conduit au relevé de l'objet. Si l'on analyse ces deux moments du relevé de l'ordre architectural, on s'aperçoit facilement qu'ils sont strictement interdépendants dans un rapport qui n'est ni hiérarchique, ni séquentiel. En effet, pour dessiner un élément de l'ordre il faut connaître sa forme ; pour connaître sa forme il faut le relever ; mais pour le relever il faut savoir en déchiffrer la structure au travers de l'étude de sa genèse historique et au travers du dessin. Dans ce sens, une des manières les plus efficaces pour définir le relevé d'architecture est de le considérer comme la reconstruction du projet [Migliari, 2000]. Le relevé est en effet un processus inverse dans lequel, à partir d'un objet existant, on reconstruit les élaborations nécessaires à sa réalisation, et on interprète l'idée de conception qui est en amont de sa réalisation. Le projet, par contre, est déjà un modèle : le modèle de l'idée de conception. La réalisation est en effet une approximation du projet, dans laquelle l'intervention des maîtres d'œuvres, les exigences de chantier et enfin les traces laissées par le temps provoquent des modifications parfois très importantes. On peut alors distinguer dans la construction d'un édifice deux moments essentiels : celui d'une préfiguration idéale et parfaite comme peut l'être une idée matérialisée par un dessin et celui d'une réalisation physique concrète et imparfaite. De la même manière on peut en déduire que le relevé architectural peut s'articuler en deux moments distincts : celui dans lequel, partant de l'objet existant, on acquiert un modèle numérique imparfait, et celui dans lequel partant du modèle numérique on tente de déduire un modèle figurant l'idée de composition en se servant cette fois encore du dessin d'architecture. Ces deux moments peuvent être appliqués à l'analyse des phases évolutives de l'édifice, depuis sa conception primaire jusqu'à son état actuel. Le point important consiste à définir la genèse de la forme de l'élément au travers d'une séquence d'opérations simples et en même temps de définir les opérations nécessaires à la mesure et celle nécessaires au dessin. Toujours pour [Migliari, 2000] la genèse historique peut être établie suivant trois voies : la première est l'étude des traités d'architecture, la deuxième est l'étude du mode de réalisation de l'élément, par des pièces non achevées retrouvées par exemple dans les caves où elles étaient travaillées ; la troisième, consiste dans l'étude des tracés pour le dimensionnement et la construction des

parties de l'ordre qui se retrouvent gravés sur les abaque des chapiteaux et, en général, sur les pierres des monuments antiques. Nous ferons référence surtout à la première voie, en se basant sur les traités d'architecture qui décrivent les connaissances capitalisées en matière de composition architecturale dans les différentes périodes historiques.

5.3.1.1 Le rôle des traités dans l'histoire de l'architecture

L'ouvrage *De Architectura libri decem (Dix livres sur l'architecture)*, écrit au troisième siècle avant J-C par Gentile Vitruvius, est le plus ancien traité d'architecture. Il capitalise les principes architectoniques de l'Antiquité dans une structure en dix volumes qui vont de la description des techniques de construction aux règles de composition architecturale. Ce traité constitue la base sur laquelle s'appuient toutes les théories de l'architecture à partir de la Renaissance. En effet, pendant tout le Moyen Âge, la tradition vitruvienne perdure dans de nombreux manuscrits mais ne joue qu'un rôle secondaire dans la pratique constructive où les connaissances étaient détenues par un nombre restreint de personnes. Avec la réappropriation du texte de Vitruve par les humanistes, le vocabulaire et la grammaire des compositions classiques redeviennent un canon obligé. À partir de [Alberti, 1452], la composition architecturale s'appuie sur la triade vitruvienne : firmitas, utilitas, venustas. Tout édifice doit être à la fois durable, utile, et beau. Ces principes structurent ainsi les traités d'architecture en définissant leur contenu. Firmitas recouvre tous les aspects techniques de la construction (site, matériaux, fondations), utilitas renvoie à la fonction de l'édifice et venustas à la beauté architectonique. Dans les traités cette dernière est abordée par un ensemble de règles proportionnelles qui composent les éléments du vocabulaire classique en ensembles harmonieux. La conception vitruvienne de la beauté architecturale englobe la doctrine de colonnes, des proportions et des règles du decorum. Ce triple objet de l'architecture (solidité, commodité, beauté) conserve toute sa validité jusque vers 1800. Ce n'est qu'à partir de cette époque que commence le déclin du canon vitruvien et de l'unité du style classique. La description de l'architecture perd sa fonction subordonnée et l'attention porte plus fortement sur l'historicité des édifices ; en particulier, l'adéquation de l'architecture devient l'objet d'un débat et l'imitation de l'antique une « fonction » [Biermann et al, 2003]. Au XIXème siècle, à côté des nombreuses discussions théoriques autour du style, l'accent déterminant est surtout donné par les grands albums et recueils de modèles qui proposent un panorama représentatif des modes d'emploi pour la pratique constructive et servent de manuels aux étudiants et aux architectes. Après ce siècle dominé par le débat sur le style, les attentes que l'époque moderne adresse à l'architecture relèvent de plus en plus du domaine technique ou social, c'est-à-dire de domaines non esthétiques.

5.3.1.2 Le rôle de la représentation dans l'histoire de l'architecture

[Serlio, 1619] est l'auteur du premier vrai traité d'architecture illustré des temps modernes. Depuis, l'amélioration des méthodes de représentation ont permis de transférer sur les traités les techniques pour le contrôle géométrique de la forme (figure 40) comme l'attestent par la suite les planches en grand format des traités de [De l'Orme, 1561] et de [Barbaro, 1556]. Les dessins de ces traités sont d'une telle précision que l'architecte pouvait s'en servir de modèles pour les mesures et en analyser les moindres détails au compas. Cependant, ce qui nous intéresse le plus est la manière dont les traités mettent l'architecture en images. Les architectes de la renaissance effectuent des relevés détaillés des monuments antiques dans le but de les transporter tels qu'ils apparaissent à l'œil, en vertu des lois de l'optique ; ce faisant ils prédestinent leurs dessins à la reproduction. [Alberti, 1452] formule la théorie de la représentation des choses : seule la projection orthogonale réduite à deux dimensions reproduit l'objet dans

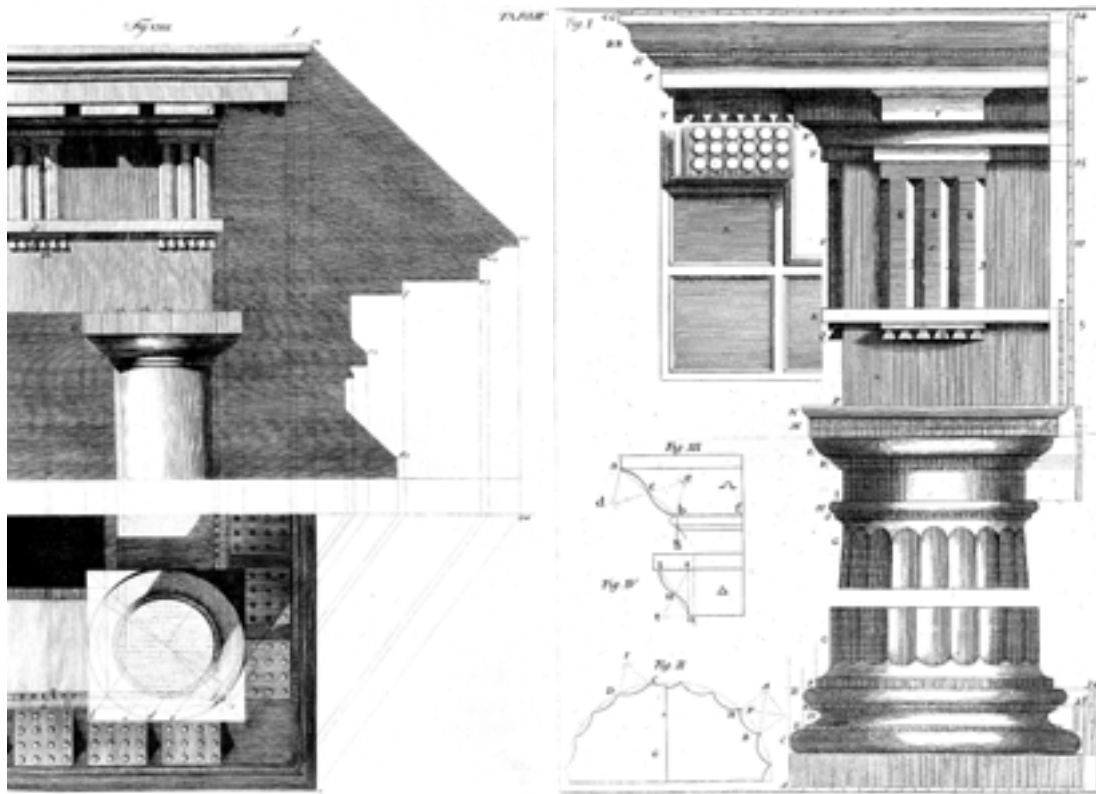


Figure 40. Deux planches des traités d'Architecture. À gauche une étude d'ombres dans [Weinbrenner, 1819]. À droite une représentation de l'ordre dorique dans [de Cordemoy, 1706].

ces mesures exactes, la construction tridimensionnelle résultant dès lors de la combinaison de plusieurs tracés de ce type. Toutefois, ce mode d'approche n'excluait pas l'exploitation de vues perspectives (les « scaenographiae » de Vitruve). En effet beaucoup de théoriciens dans les siècles suivants s'efforcent de répondre aux exigences antagonistes de clarté et d'exactitude des mesures, mélangeant à cette fin les deux formes de représentation (figure 39) ; d'autres architectes comme [De l'Orme, 1561], expérimentent des méthodes de géométrie descriptive, bien avant qu'elle ne devienne une science mathématique. Une des plus remarquables œuvre de représentation architecturale pour sa qualité d'information et sa systématisme d'exposition est certainement celle des Quatre livres d'Architecture, [Palladio, 1570]. Les quatre livres démontrent une méthode pour composer et représenter le projet d'architecture dans son ensemble et dans ces parties. La structure de représentation mise au point dans cet ouvrage est un système de description des caractères de chaque élément basé sur un schéma donné par un plan et une vue de face. La structure constructive de l'objet rappelle encore le schéma conceptuel formalisé par Vitruve, qui considère la constitution de la forme de l'édifice comme une collocation d'éléments simples (ordonnée) à l'intérieur d'un schéma général (dispositif). Dans le premier livre, le discours se développe du général au particulier en partant de l'ordre. Les ordres, tels que présentés par Palladio, représentent une codification de leurs identités. Cette identité est exprimée au travers d'une description approfondie et hiérarchique de tous les éléments qui composent les parties de l'édifice.

5.3.2 Les moulures : unités atomiques de l'architecture classique

Nous avons déjà vu que les compositions architecturales classiques s'appuient sur l'articulation d'un vocabulaire et d'une grammaire préétablis. Le problème de la formalisation de la nature géométrique d'objets architectoniques consiste avant tout en l'identification des entités atomiques qui les composent pour constituer des ensembles par combinaison mécanique. Or, une classification de ces éléments de base ne peut être conduite que par une analyse de la morphologie qui fait référence aux systèmes descriptifs et de représentation qui ont conduit leur conception. Il est donc évident de faire appel aux traités d'architecture, en fonction de la période à laquelle l'objet d'étude appartient. Pour expliquer notre propos nous prendrons l'exemple de l'architecture classique, pour laquelle l'abondance de théorisations dans l'histoire rend la tâche plus simple.

En se basant sur des sources historiques et sur des observations directes, [Rattner, 1998] a développé une classification des moulures en montrant de façon systématique le rôle qu'elles jouent dans la conception d'édifices. L'auteur définit les moulures comme les plus petites unités physiques - les atomes - de l'architecture classique et donne une voie pour comprendre la forme des éléments architecturaux en fonction de leur combinaison. Cette classification s'appuie sur une variété de 14 moulures et utilise plusieurs critères de regroupement. Au niveau le plus élémentaire, on peut regrouper cette variété d'atomes en fonction de **l'analyse de la forme**. On distingue d'abord les moulures plates, les concaves, les convexes et les composites (figure 41 colonnes de gauche à droite).

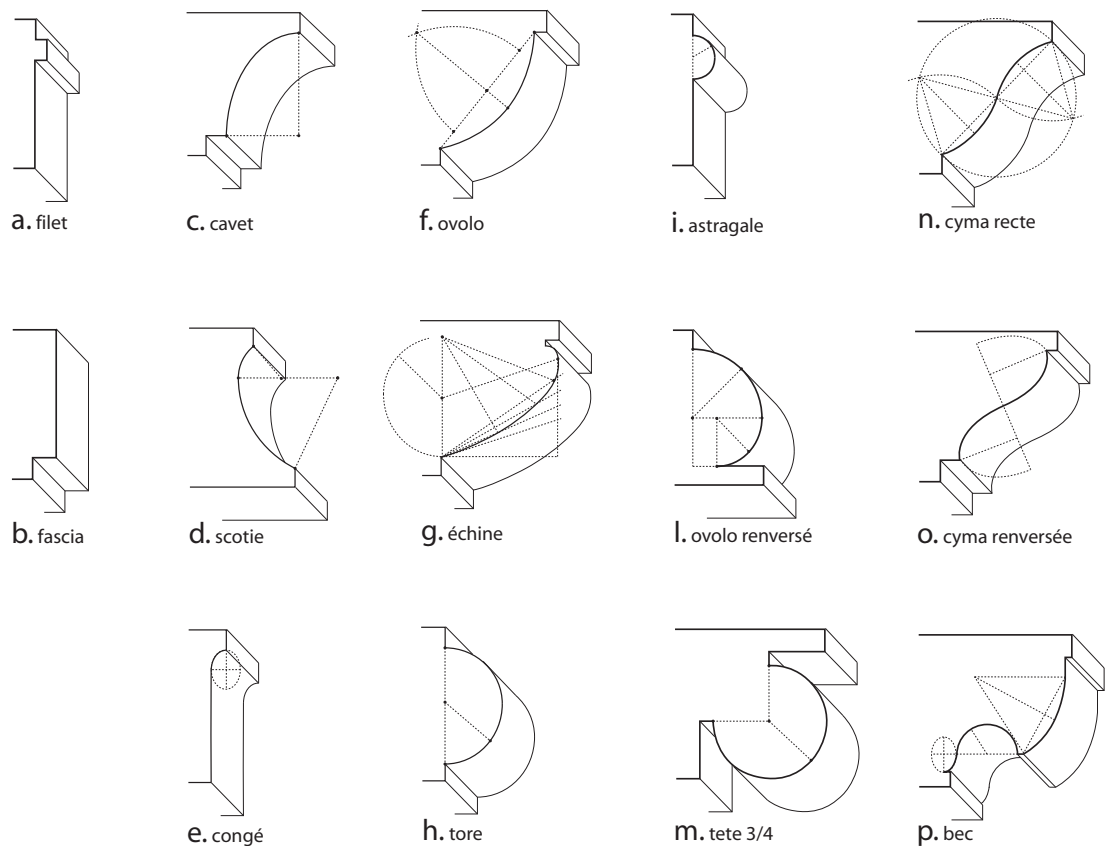


Figure 41. Classification des moulures de l'architecture classique proposée par [Rattner, 1998].

On peut aussi regrouper la même variété de moulures, selon leur **fonction architecturale** dans la composition du bâtiment. On distingue alors : les moulures couronnantes qui sont employées pour marquer les limites en hauteur et qui se terminent généralement par une courbe concave, les moulures de support dont la forme convexe suggère la capacité de soutenir les moulures qui les surmontent et les moulures de transition qui soulignent les transitions des plans verticaux aux plans horizontaux.

En ce qui concerne la combinaison des moulures en profils, nous pouvons distinguer certains des principes qui guident la conception des bâtiments classiques (figure 42).

Dans la figure 42 (a), les moulures sont le plus souvent combinées en série pour former un profil. Cette association est basée sur des stratégies qui visent à obtenir un effet visuel ou à résoudre des problèmes de transition entre les plans. Une moulure de base, par exemple, sert de pied visuel au poids du mur qui s'élève au-dessus ; en second lieu, elle module la transition entre les plans verticaux et horizontaux du mur et du plancher ; troisièmement, elle ponctue le

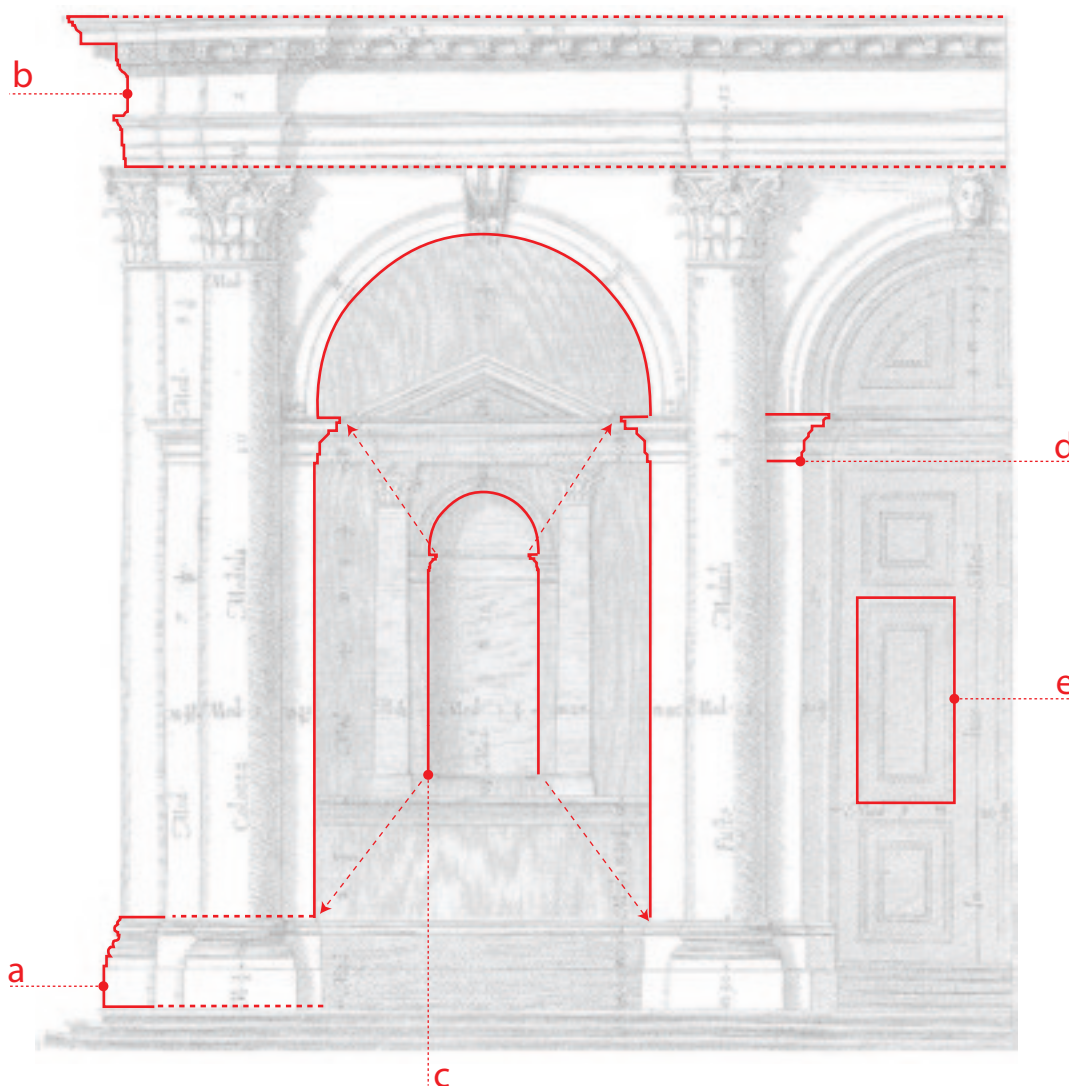


Figure 42. Schéma illustrant les rôles des moulures dans la composition d'un édifice classique. Illustration élaborée sur la planche d'un portique à arcades d'ordre corinthien [Scamozzi, 1615].

fond du mur. La ponctuation est étroitement liée à l'inflexion, qui se rapporte à l'altération de la forme, où une part est sur le point d'être transformée en une autre.

Dans la figure 42 (b), l'entablement ainsi que tous les éléments qui s'étendent sur une dimension (verticale ou horizontale) significative d'une façade ont pour objectif de créer des divisions structurellement significatives de la surface.

Dans la figure 42 (c), tandis qu'il est illogique d'avoir deux échelles différentes dans une séquence particulière de moulures, il est commun d'avoir des éléments moulurés appartenant à diverses échelles. Dans les édifices classiques on distingue généralement deux échelles principales qui marquent le rapport entre la dimension humaine et architecturale. La taille des moulures se relie à l'échelle de l'élément qu'elles composent. Ce rapport taille-échelle sert à établir la hiérarchie entre les éléments.

Dans la figure 42 (d), les moulures servent aussi à articuler la structure : par exemple l'imposte, la transition d'un pilier droit à un arc ou une voûte ronde, est un groupe de moulures qui exprime le rôle tectonique de l'élément qui le surmonte.

Dans la figure 42 (e), l'habitude dans la conception classique d'encadrer des éléments, en décomposant une surface en compartiments régularisés est reflétée dans le panneautage. Là, les moulures aident à la médiation du passage d'un plan à l'autre en articulant les bords du panneau.

D'un point de vue géométrique, l'aspect qui nous intéresse le plus est certainement celui de la coordination. La localisation relative d'une moulure, ainsi que son ses proportions, implique la coordination de différentes parties pour composer un ensemble ordonné. Ceci est habituellement atteint au moyen d'alignements de plans.

Dans une base par exemple (figure 43), quand un tore est placé au-dessus d'une plinthe, son point extérieur est typiquement aligné au plan vertical prolongé de l'élément surmonté. Un axe horizontal partant du barycentre du tore en intersection avec ce plan identifie alors le point de tangence de la perle demi-ronde qui caractérise son profil. Ce type d'observation peut être intéresser presque tous les éléments du langage classique.

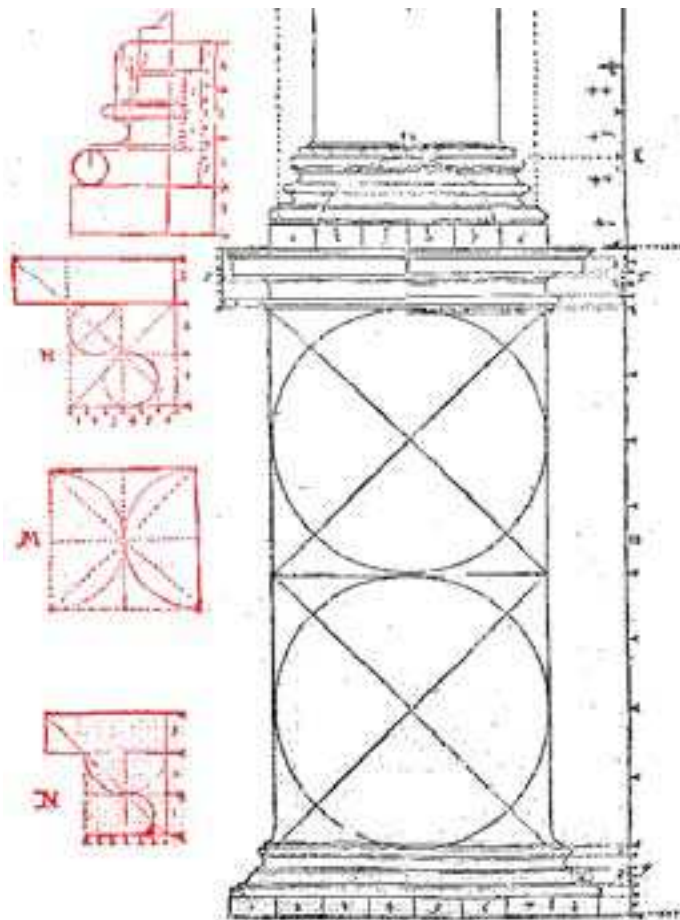


Figure 43. Construction de l'ordre composite. Dans [Blum, 1550].

5.3.3 Formalisation de primitives architecturales

Dans cette section, nous présentons la méthode développée pour formaliser des primitives architecturales à partir de l'analyse de sources historiques. Le point de départ de notre démarche de formalisation réside dans l'observation de la nature géométrique de la plupart des éléments architecturaux. En effet, dans plusieurs cas, leur forme dérive de la révolution autour d'un axe ou de l'extrusion d'un profil plan avec une géométrie fortement ordonnée et connectée. Nous présenterons d'abord les éléments qui entrent en jeu dans un contexte de formalisation, ensuite nous prendrons comme exemple l'élaboration d'une primitive architecturale : le chapiteau dorique selon Palladio.

La définition de l'approche de formalisation prend en compte trois dimensions distinctes:

- L'interprétation des connaissances relatives à la forme ;
- La définition des méthodes permettant sa modélisation géométrique ;
- L'identification des relations entre les parties constituant la forme.

La première phase consiste à décrire de façon théorique un élément architectural (définition de son modèle générique : un template, en identifiant le vocabulaire qui permet d'exprimer ses sous-éléments et les règles de composition qui gouvernent sa composition. Pour cela, on se base sur les traités d'architecture qui capitalisent les connaissances de l'art de bâtir. Les règles de composition extraites de l'analyse des traités architecturaux sont exploitées pour décrire un modèle géométrique. Enfin, les primitives préalablement modélisées sont utilisées pour restituer les éléments relevés à l'aide d'un processus d'instanciation.

5.3.3.1 Le langage de la formalisation

Comme nous avons l'exigence de manipuler les entités que nous formalisons en trois dimensions, nous basons notre démarche sur l'élaboration d'un réseau de nœuds développés en langage MEL. Un nœud est une structure qui peut organiser, recevoir et fournir des informations au travers de ses attributs. Une surface polygonale ou NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) entière peut être enregistrée dans un nœud sous la forme d'un attribut. En connectant de simples nœuds une chaîne de calculs est créée dans le graphe de dépendance (DG) pour produire le résultat final. Le DG est basé sur un modèle push-pull : quand on fournit une information à un nœud, celui-ci provoque une propagation d'altérations de tous les nœuds qui reçoivent et/ou traitent cette information [Gould, 2002].

5.3.3.2 Les éléments de la formalisation

Plusieurs auteurs ont apporté des contributions importantes au problème de la classification des éléments moulurés [Perouse de Montclos, 1972] [Ginouvés et al. 1985]. Ces classifications se concentrent par contre sur l'analyse du langage de composition en relation à une période spécifique. De plus, comme les auteurs l'indiquent, un certain nombre de moulures résulte de la combinaison de moulures de base. La classification que nous avons présenté dans la section précédente montre bien que l'étude de la forme d'éléments moulurés exige avant tout une analyse approfondie de leurs caractéristiques géométriques. Avec la géométrie comme point de vue central, une analyse comparative des moulures classiques nous permet d'extraire une série de constats :

- Toute moulure résulte d'une combinaison de segments linéaires ou d'arcs ;
- Toute transition géométrique dans un profil (ou à l'intérieur d'une moulure) est basée sur l'orthogonalité entre deux plans de construction ;
- Toute partie courbe complexe dans une moulure (concave ou convexe) résulte de la déformation de son enveloppe englobante ou d'une construction polycentrique d'arcs tangents.

En ce qui concerne la forme d'un élément mouluré on peut observer que :

- Toute surface résulte d'un profil générateur et d'un parcours directeur ;
- Le profil générateur et le parcours directeur sont toujours en condition d'orthogonalité (même quand le second est une courbe) ;
- Tout parcours directeur résulte de la combinaison des mêmes entités géométriques composants les moulures mais à une échelle différente.

À partir de ces constats, nous basons notre approche d'analyse sur la formalisation des connaissances liées à la forme architecturale dans le but d'en extraire les principes fondamentaux de sa construction géométrique. Cependant, le découpage de la forme résultant des exigences de modélisation géométrique n'est pas forcément cohérent avec celui qui permet sa description sémantique. Un terme architectural peut par exemple identifier une partie de l'objet dont les surfaces sont générées à partir de deux procédures de modélisation distinctes. Pour résoudre ce problème nous organisons la formalisation de l'élément en fonction des relations entre deux niveaux parallèles de description : géométrique et sémantique. Le premier permet de reconstruire la forme en trois dimensions, le second permet d'organiser ses parties en fonction du vocabulaire de l'architecte. Nous présentons d'abord les éléments qui entrent en jeu dans notre démarche de formalisation, ensuite nous focalisons sur les relations que nous établissons entre la description géométrique et sémantique de l'élément architectural.

5.3.3.3 La description géométrique

La première phase de notre analyse consiste à identifier les éléments géométriques primitifs exploitables en combinaisons mécaniques pour la construction des moulures. Dans le but d'étendre le cadre de formalisation à un nombre de cas plus élevé (éventuellement relatif à

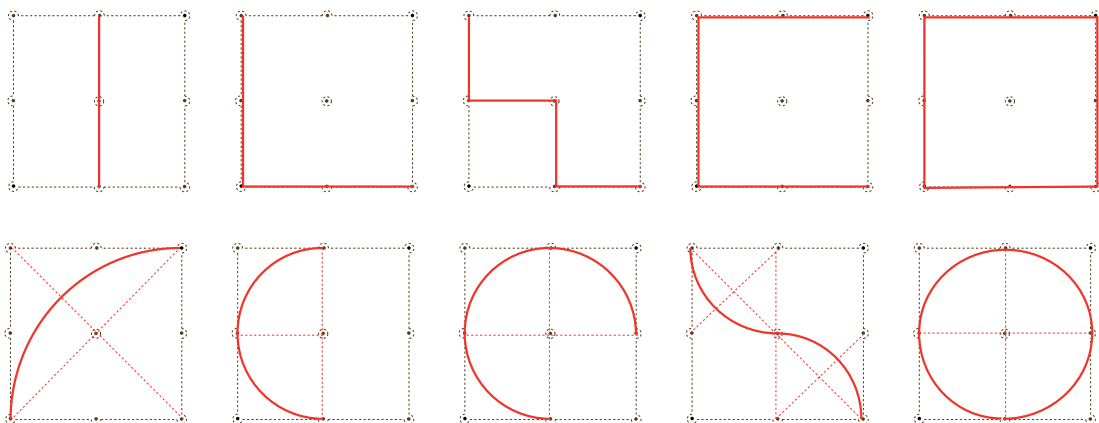


Figure 44. Atomes géométriques pour la construction des moulures de l'architecture classique.

d'autres périodes historiques) nous introduisons un niveau de description inférieur à celui des moulures : les atomes géométriques. Il s'agit d'un ensemble fini de primitives géométriques permettant de reproduire par combinaison toute sorte de moulure de la classification présentée (figure 44). Ces atomes sont les seules entités de la formalisation pour lesquelles nous fournissons une information géométrique (points de contrôle d'une ligne ou d'une courbe): en effet, la génération de la surface entière de l'élément s'appuie exclusivement sur des relations de contrainte entre ces atomes, sur des opérations de groupage et sur des fonctions de modélisation géométrique. La description géométrique s'appuie sur les relations entre quatre types de nœuds qui décrivent la construction de l'élément depuis la définition de ses atomes géométriques jusqu'à la génération complète de son volume.

- *Atomes.* Ce type de nœud est caractérisé par une structure d'informations essentielles pour la construction géométrique, la transformation dans l'espace et l'établissement de relations.
- *Profils.* Ce niveau permet de regrouper les moulures en fonction des plans de construction.
- *Surfaces.* Ce niveau utilise des nœuds spécifiques pour la génération des surfaces à partir des profils.
- *Volumes.* Ce niveau permet de décrire les volumes généraux de la primitive en fonction des relations entre les surfaces générées. Des nœuds spécifiques permettent d'établir des relations d'union, de différence et d'intersection.

5.3.3.3.1 les atomes géométriques (1^{er} niveau)

Un nœud atome contient les informations essentielles pour sa représentation dans l'espace (position, rotation, échelle) et contrôle quatre sous-nœuds qui partagent des attributs (figure 45).

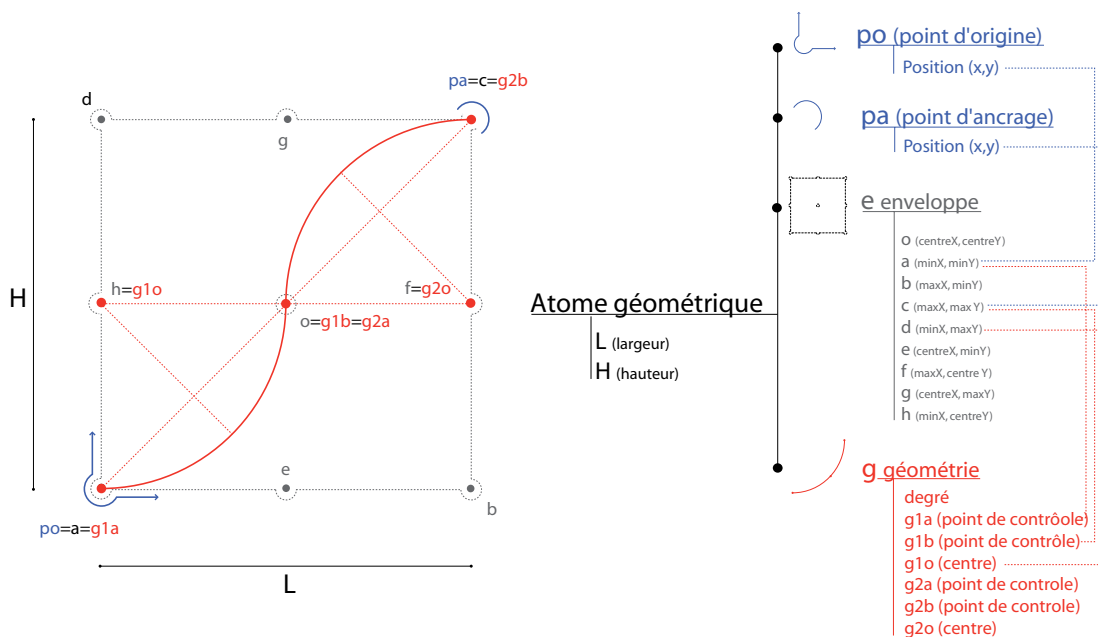


Figure 45. Schéma des relations d'attributs du nœud «atome géométrique».

- L'enveloppe constitue un support déformable sur lequel un atome est construit. Elle est basée sur une grille à 9 points d'appuis qui sert d'unité de référence.
- L'origine définit le premier point de contrôle de l'atome géométrique
- L'ancrage définit son dernier point de contrôle et il est exploité pour contraindre la position d'un atome qui lui est connecté.
- La représentation géométrique contient les points de contrôle d'une courbe B-Spline définissant la géométrie de l'atome.

5.3.3.3.2 les profils (2^{ème} niveau)

Le deuxième niveau de description géométrique résulte d'une combinaison mécanique d'atomes. Cette combinaison est basée sur une logique d'agrégation ascensionnelle en fonction de l'axe vertical d'un plan de construction et elle est réalisée par un héritage de l'attribut de position (vecteur de translation - Tx, Ty, Tz) : le nœud origine d'un atome est contraint au nœud ancrage de l'atome qui le précède dans la chaîne (figure 46).

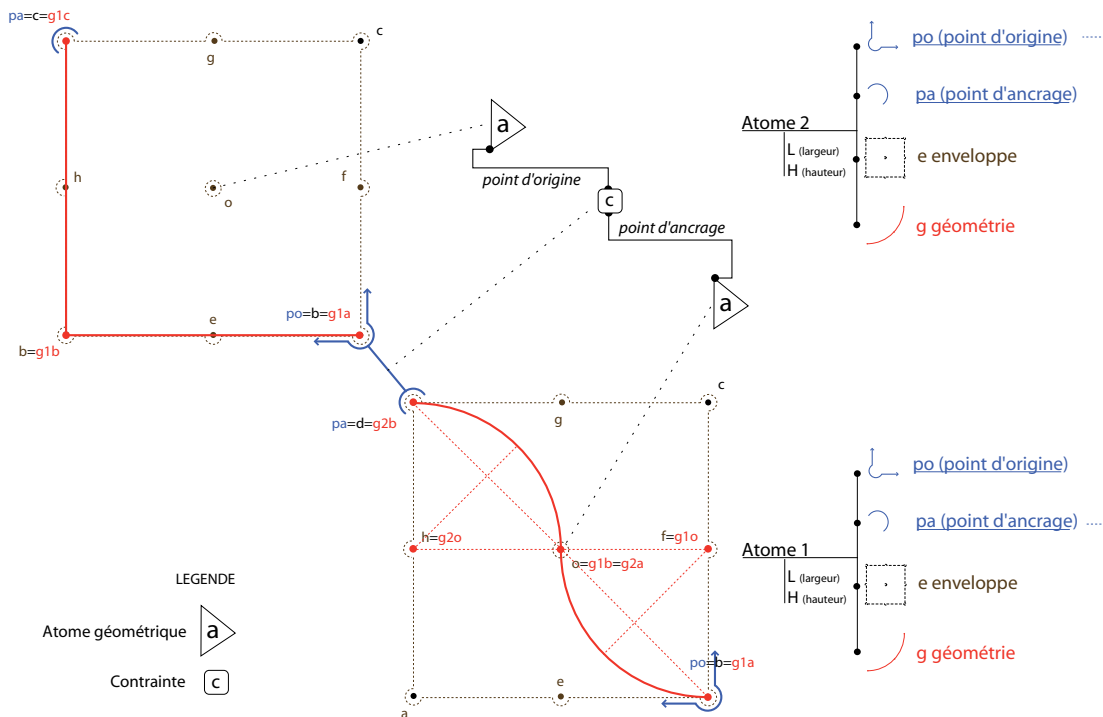


Figure 46. Schéma de la connexion d'attributs entre deux nœuds «Atome géométrique»

À partir de cette méthode nous pouvons reconstruire toute la variété de moulures présentes dans la classification de [Rattner, 1998]. La figure 47 montre la reconstruction de la moulure la plus complexe de la classification : le bec.

À chaque niveau de la combinaison progressive, nous modifions les attributs de largeur et de hauteur de l'atome correspondant. Ces attributs déforment la grille de l'enveloppe de l'atome à laquelle est connectée la représentation géométrique. Le regroupement des atomes en profils est établi en fonction des procédures de reconstruction des surfaces.

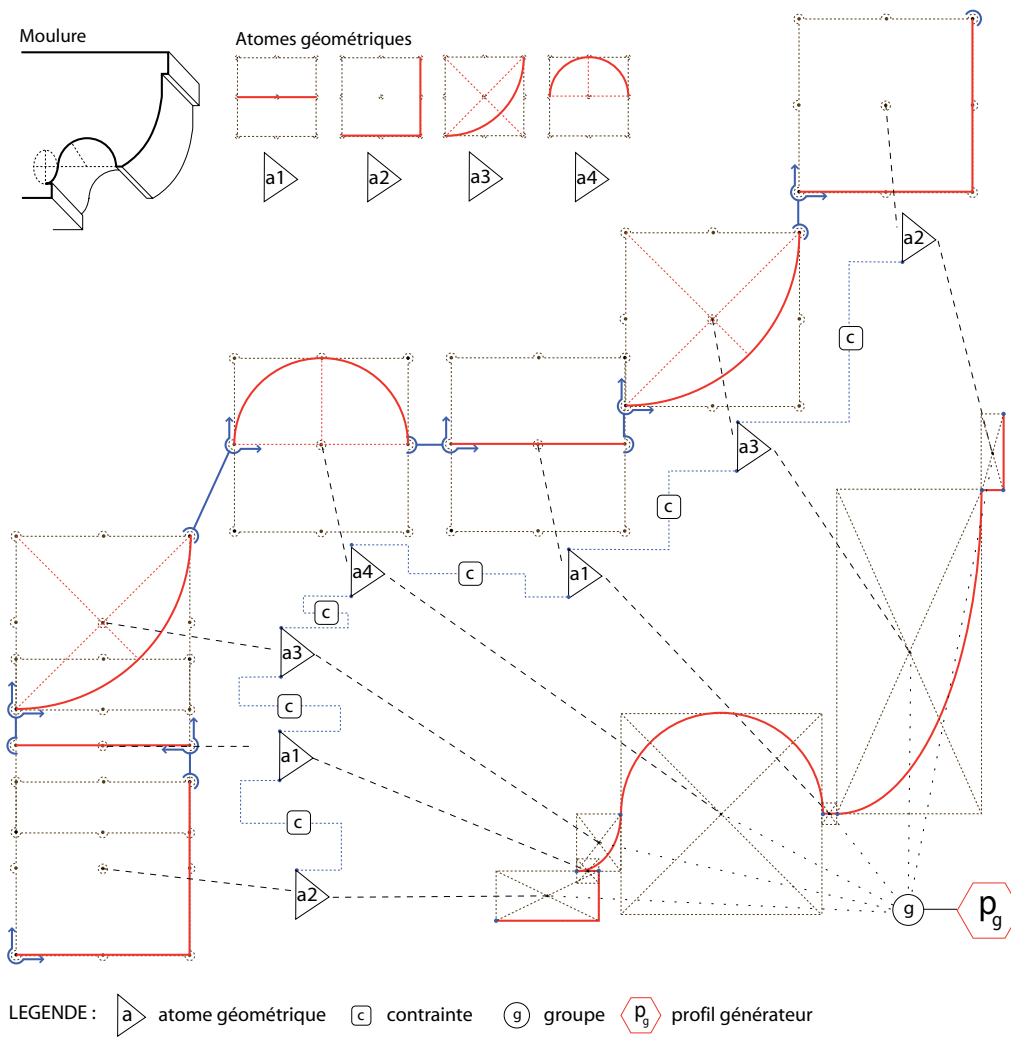


Figure 47. Construction d'une moulure par combinaison mécanique d'atomes géométriques.

Pour un grand nombre de surfaces deux profils sont suffisants. Il s'agit en effet d'identifier la génératrice et la directrice de la surface. Comme dans le cas du nœud profil générateur (combinaison de plusieurs moulures), le nœud profil directeur peut aussi être défini par combinaison d'entités primitives (figure 48).

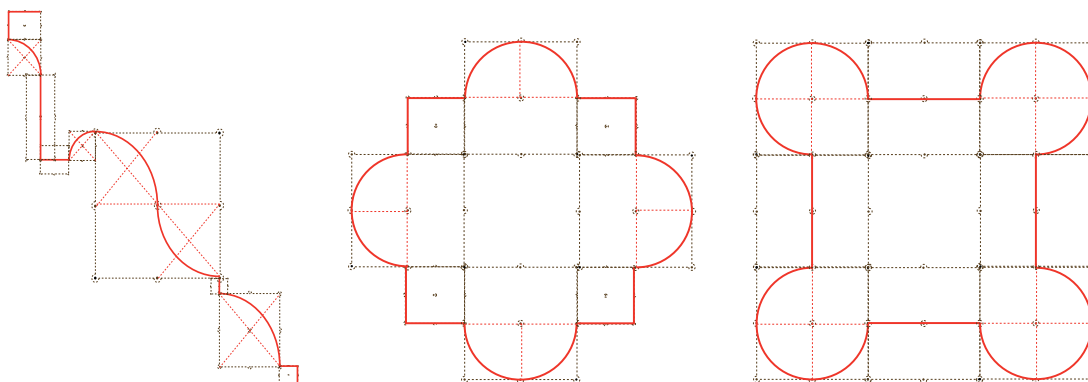


Figure 48. Un profil vertical et deux horizontaux construit par combinaison mécanique d'atomes géométriques.

Les atomes utilisés pour la construction de moulures sont en effet adaptés à la description des parcours de génération des surfaces. La différence vient de la configuration de ces profils: les profils directeurs peuvent être fermés. Dans ce cas une connexion d'attributs contraint le nœud ancrage du dernier atome du profil directeur avec le nœud origine du premier. Ensuite, les courbes représentant les deux atomes sont transformées en une unique courbe par la commande MEL (attachCurve).

5.3.3.3 les surfaces (3^{ème} niveau)

Ce niveau de la description géométrique est basé sur la notion d'historique de construction de la surface. Il s'agit d'une propriété de notre environnement de développement que nous exploitons pour sauvegarder les informations constituant les entrées d'un processus de modélisation. La surface est en effet générée par un nœud fonction de modélisation (extrusion linéaire, courbe ou combinée) qui reçoit les informations géométriques d'un nœud profil générateur et d'un nœud profil directeur. Une fois la surface générée les deux nœuds d'entrée sont par conséquent connectés aussi au nœud surface. Cela permet de mettre à jour la surface complète à chaque transformation d'un atome. Nous basons les procédures de modélisation sur trois variantes de la fonction de balayage (section 2.2.3.2). Dans les trois cas la géométrie du profil générateur est balayée le long du profil directeur (figure 49). Les variantes concernent la composition du profil directeur et le degré de la surface résultante. Nous décomposons le profil directeur en fonction de ce dernier attribut. La génération de la surface avance par

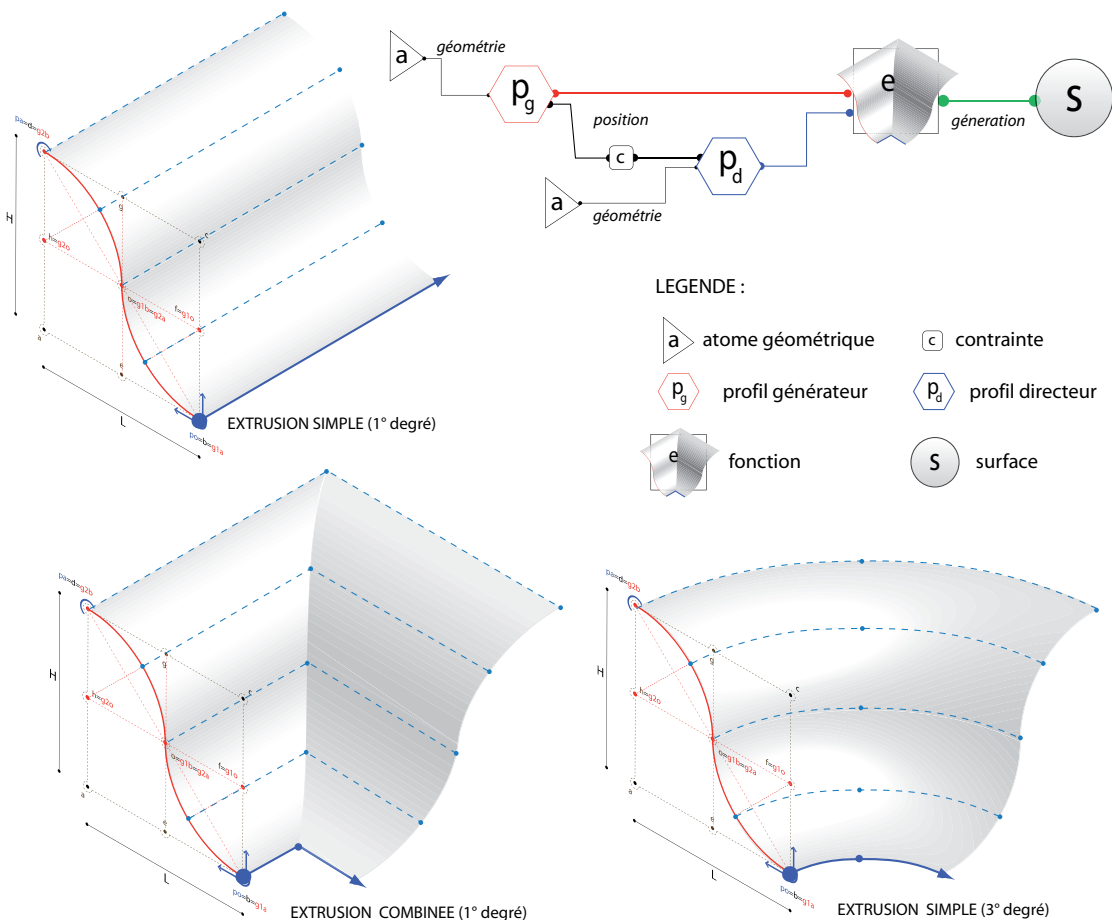


Figure 49. Fonctions de génération des surfaces formalisées.

morceaux, quand un changement de degré (de 1° à 3° ou vice-versa) est détecté une nouvelle surface est créée en accord avec le degré de la courbe directrice. Cette nouvelle surface utilise comme courbe génératrice la dernière courbe isoparamétrique de la surface précédente. Cela assure la continuité entre les différents morceaux de surface. La même technique est utilisée pour créer les surfaces de remplissage planaire sur les extrémités de la surface.

5.3.3.3.4 les volumes (4ème niveau)

Le dernier niveau de la description géométrique définit la façon dont les différentes surfaces s'organisent en volumes. Pour la majorité des éléments architecturaux que nous avons pris en considération cette organisation résulte d'un simple regroupement de plusieurs surfaces (union de deux ou plusieurs parties distinctes) ou d'une intersection entre les parties de l'élément (fonctions booléennes). Compte tenu de la dépendance entre les profils et les surfaces, l'union entre les deux surfaces peut être établie par une contrainte introduite entre deux profils. Pour d'autres éléments, des relations plus complexes entrent en jeu. Nous introduisons entre les nœuds surface et le nœud volume un nœud intersection. Ce nœud exploite la fonction MEL (intersect). Cette commande crée une courbe à l'intersection entre deux surfaces. Le nœud intersection utilise les deux surfaces comme entrées. Comme dans les cas de la génération des surfaces à partir des profils, l'intersection entre deux surfaces est mise à jour à toute modification des nœuds d'entrées. La fonction (trim) permet enfin de sélectionner sur les surfaces les régions en surplus définies par l'intersection et de les effacer. Cette fonction n'est par contre pas contrôlable dynamiquement car elle recalcule le paramétrage de la surface résultante de la soustraction. Pour garantir une cohérence entre les surfaces en intersection nous procédons de la façon suivante : nous stockons les informations sur les surfaces avant la soustraction dans le nœud intersection, quand une modification de la surface d'entrée est détectée, nous reconstruisons la surface dans son état initial. À la fin de la modification, l'intersection entre les surfaces et l'effacement de la région est recalculée.

5.3.3.3.5 Un exemple : formalisation d'un chapiteau

La figure 51 montre la construction géométrique d'un chapiteau dorique selon [Palladio, 1570] obtenue par une simple combinaison d'atomes géométriques regroupés en deux profils générateurs et extrudés le long de deux profils directeurs. Pour la formalisation de l'élément, nous nous appuyons sur la description fournie par l'auteur et sur la planche relative (figure 50) :

“...Il **capitello** deve essere alto la metà del diametro della **colonna**: e si divide in tre parti : quella disopra si dà all'**abaco**, e **cimacio**: il cimacio è delle cinque parti di quelle le due, e si divide in tre parti: d'una si fà il **listello**, e dell'altre due la **gola**. La seconda parte principale si divide in tre parti uguali: una si dà à gli **anelli**, o quadretti: i quali sono tre uguali: l'altre due restano all'**ovolo**: il quale ha di sporto i due terzi della sua altezza. La terza parte poi si dà al **collarino**. Tutto lo sporto è per la quinta parte del diametro della colonna. L'**atragolo**, o tondino è alto quanto sono tutti tre gli anelli, e sporge in fuori al vivo della colonna da basso. La **cimba** è alta per la metà del tondino: il suo sporto è à piombo del centro di esso tondino...”

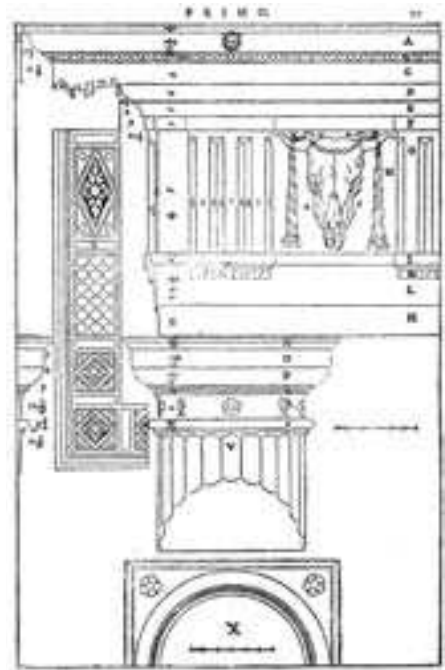


Figure 50. Description du chapiteau d'ordre dorique. Dans [Palladio, 1570].

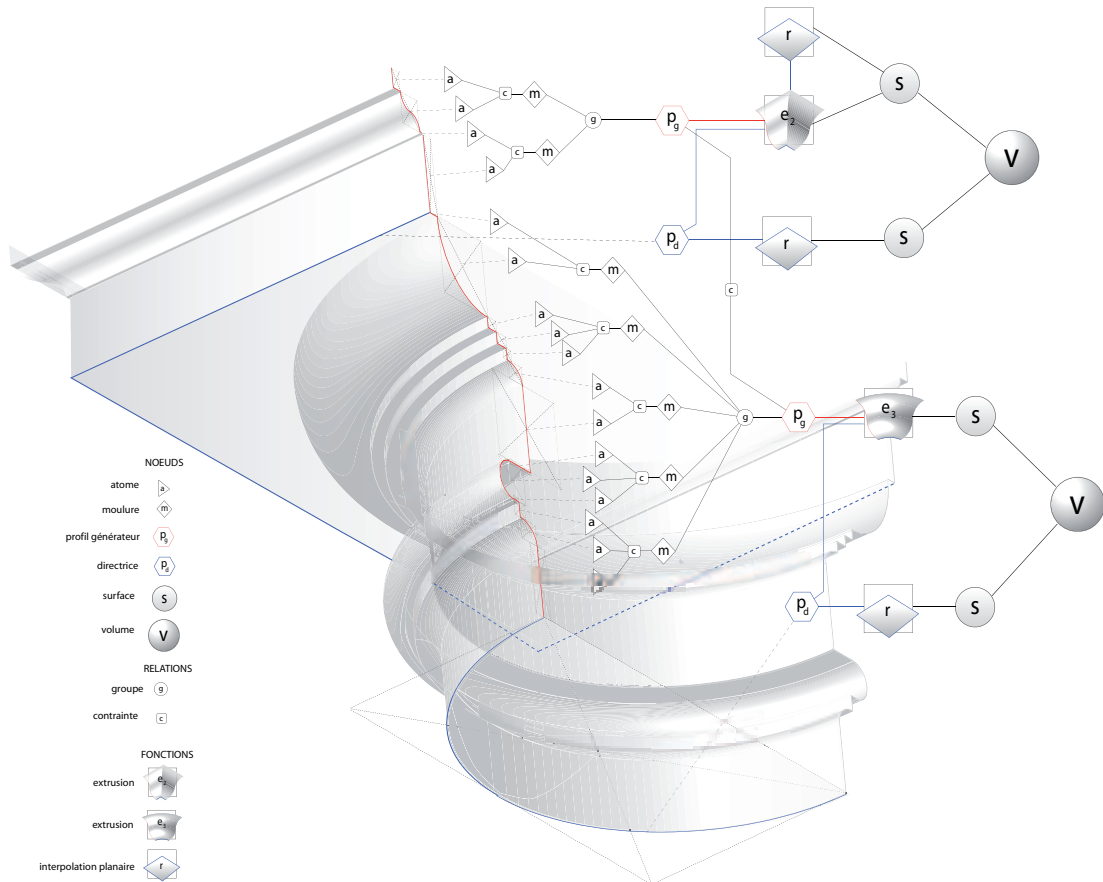


Figure 51. Description géométrique d'un chapiteau dorique à partir du traité de Palladio.

Nous connectons des nœuds atomes en fonction des moulures décrites. Une fois proportionnées les moulures de façon opportune - ceci est possible à la fois en lisant les dimensions présentes sur le dessin (figure 50) ou en utilisant la planche numérisée comme support de restitution - nous les regroupons en deux nœuds-profil générateurs en fonction des procédures de modélisation respectives. Sur la partie inférieure, nous appliquons une fonction d'extrusion de degré 3 le long d'un cercle. Sur la partie supérieure, une extrusion de degré 1 le long d'un profil directeur carré. Les surfaces résultantes de l'extrusion, unies à celles issues des fonctions de remplissage sont enfin regroupées en deux nœuds volumes.

5.3.3.4 La description sémantique

La description sémantique est définie par une structure de concepts organisés autour de la description géométrique. Les nœuds de la description sémantique sont reliés d'un côté à un terme architectural et de l'autre ils regroupent les éléments de la description géométrique dans une structure hiérarchique : atomes/moulures/parties du profil/profil. En MEL les relations hiérarchiques peuvent être formalisées par le Direct Acyclic Graph (DAG). Ces relations concernent spécifiquement les transformations simples dans l'espace. Pour donner un exemple, dans une relation hiérarchique, les attributs de position, rotation et échelle de l'entité fille sont exprimés dans le repère local de l'entité père. Cela nous permet de sélectionner, manipuler ou déformer les parties de l'élément en fonction d'un découpage sémantique. Dans son traité d'architecture [Palladio, 1570] fournit la nomenclature précise pour décrire les différentes parties de l'objet examiné.

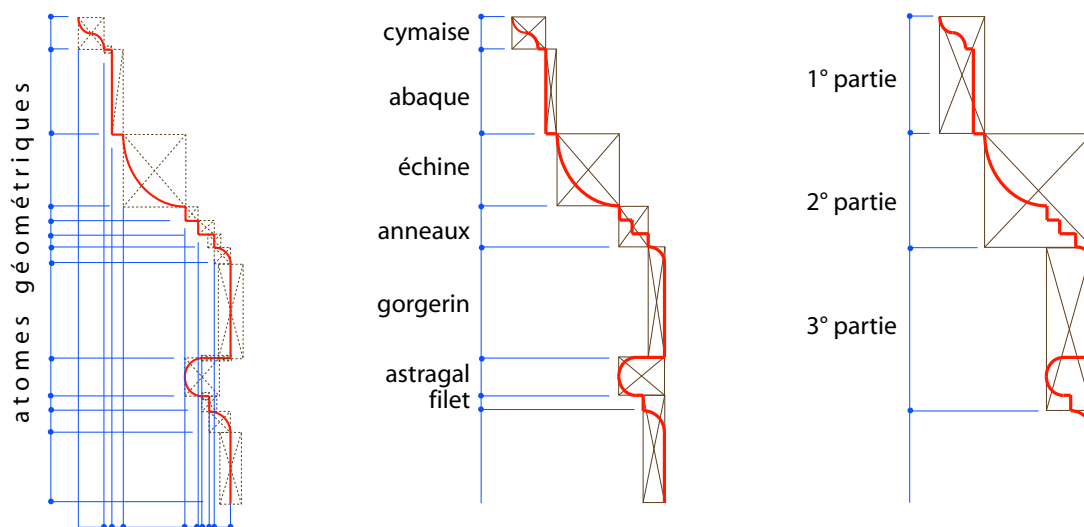


Figure 52. Description sémantique d'un chapiteau dorique à partir du traité de Palladio.

« ... Le **chapiteau dorique** se divise en trois parties distinctes. La partie supérieure est composée de la **cymaise** et de l'**abaque**. La partie centrale est constituée de l'**échine** et des **anneaux**. La partie inférieure est formée du **gorgerin**, de l'**astragal** et du **filet**... ».

Dans la figure 52 on peut remarquer les différences entre les logiques de découpage. Tout d'abord on remarque qu'un atome architectural (moulure) résulte souvent d'un ensemble d'atomes géométriques. Deuxièmement on peut observer que la description géométrique est obligée de prendre en compte toutes les discontinuités le long du profil (sur les deux axes)

et de séparer les transitions concaves et convexes des segments linéaires avec lesquels elles sont en continuité. En revanche la description sémantique résulte de l'assignation d'un terme architectural aux parties de l'objet selon une division seulement verticale. Le terme architectural identifiant une moulure indique en effet une transition dans la surface de l'élément, mais il ne spécifie pas avec précision son périmètre spatial ni tous les atomes géométriques qui lui appartiennent. Nous en déduisons qu'une description sémantique est relative à une représentation mentale de la forme ou à un mécanisme permettant d'en extraire des concepts (dans notre cas un profil) et qu'elle n'est pas toujours suffisante à la description exhaustive de sa morphologie. Cela justifie d'un côté la démarche que nous adoptons : nous ajoutons une couche sémantique à une représentation géométrique. Mais cela suggère en même temps le niveau de difficulté qu'une démarche inverse peut poser (c'est-à-dire générer une représentation géométrique à partir d'une description sémantique).

Nous avons utilisé les primitives formalisées par cette approche à deux applications distinctes :

- Instancier des primitives architecturales dans le double but de restituer les formes et d'extraire des mesures pertinentes d'un nuage de points ;
- Constituer une bibliothèque d'éléments d'architecture par déclaration d'une séquence de moulures.

Dans le premier cas, on construit une grille de lecture sémantique sur la représentation géométrique d'objets relevés. Dans le second, on construit une représentation géométrique à partir d'une description sémantique.

5.3.4 Instanciation des primitives sur le nuage de points

La notion d'historique de construction sur laquelle l'approche de formalisation est fondée, garantit les rapports entre les atomes et les surfaces générées. Cette propriété des primitives générées avec cette approche est exploitée par un processus d'instanciation basé sur trois étapes.

Dans la première, on introduit la primitive dans la scène à l'intérieur d'une boîte englobante formée d'un parallélépipède déformable et de deux plans d'intersection respectivement à l'horizontale et à la verticale. Des translations, rotations et changement d'échelle peuvent être appliqués à la primitive entière et son positionnement peut être contrôlé en temps réel sur les deux plans d'intersection. Dans cette étape, on cherche simplement à situer les extrémités de l'élément sans se préoccuper des coïncidences effectives entre la primitive et le nuage (figure 53).



Figure 53. Première étape d'instanciation de la primitive. De gauche à droite : le plan d'intersection horizontal, la primitive dans le nuage de points, le plan d'intersection vertical.

La seconde étape consiste à déformer sous-contrainte les atomes géométriques de la primitive. Cette étape exploite aussi les plans d'intersection. Une procédure permet d'orienter et de positionner automatiquement le plan d'intersection en fonction de l'atome sélectionné. La logique de déformation suit une séquence ascensionnelle. Grâce à la chaîne de contraintes formalisées, les déformations appliquées au premier atome déterminent la mise à jour des positions sur le reste de la chaîne (figure 54). Les degrés de liberté de chaque atome sont définis au moment de la formalisation. Par contre, dans le cas de l'application d'une rotation, la déformation des surfaces peut causer une dégradation de la forme finale de la primitive. Pour cette raison il faudrait aussi prendre en compte la formalisation de contraintes d'orientation (limites de déplacement, de rotation et de déformation des atomes géométriques).

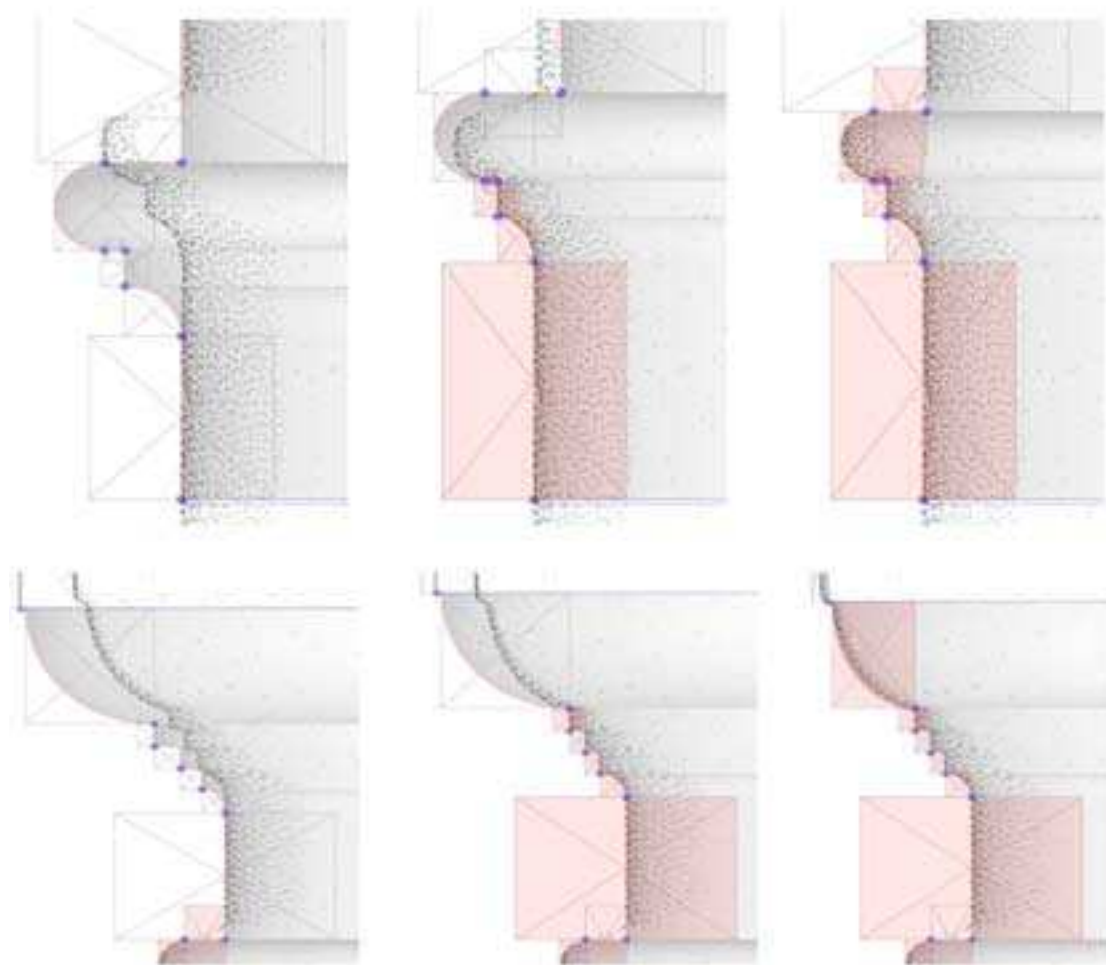


Figure 54. Deuxième étape de l'instanciation de la primitive, la déformation sous contraintes des atomes géométriques.

La troisième étape (optionnelle) permet de contrôler le niveau le plus bas de description géométrique : celui des représentations géométriques des atomes. Dans ce cas, les transformations peuvent être appliquées aux points de contrôle des B-splines (figure 55). Cette étape est importante pour adapter finement les profils sur le nuage de points : en effet, les déformations appliquées aux atomes géométriques dans la deuxième étape d'instanciation concernent l'enveloppe qui les contient. Cela constitue une limitation importante si l'on veut adapter les profils de la primitive aux coordonnées issues du balayage laser. En effet, chaque

partie de la forme relevée présente différentes imperfections dues à l'état de conservation des matériaux ou plus simplement aux erreurs de réalisation.

La procédure entière d'instanciation peut exploiter aussi les photographies calibrées là où le nuage de points reste un support d'interprétation dont l'efficacité est limitée (figure 56).

Cette procédure est actuellement manuelle. Son organisation en étapes d'ajustement progressive offre par contre la possibilité d'intégrer des automatismes.

Finalement, les relations établies entre les deux niveaux de description (géométrique et sémantique) nous permettent d'extraire de la représentation géométrique un ensemble d'informations dimensionnelles pertinentes. Par exemple, nous pouvons connaître la hauteur de l'abaque du chapiteau plutôt que la seule distance entre deux points du nuage.



Figure 55. Troisième étape d'instanciation de la primitive: les points de contrôle des courbes.



Figure 56. La primitive instanciée sur le nuage de points. À gauche, une vue sur le profil vertical. À droite, une vue sur une photographie orientée sur le nuage de points.

5.3.5 Modélisation de primitives architecturales par déclaration de moulures

Un autre type d'exploitation de l'approche de formalisation concerne la constitution d'une bibliothèque d'éléments par simple déclarations de séquences de moulures. La modélisation déclarative permet la construction géométrique d'un objet à partir d'une description en fonction d'un vocabulaire précis. Des procédures automatiques traduisent les éléments de la description en une représentation géométrique [Lucas et al., 1995]. Sur les bases de la formalisation énoncée dans les paragraphes précédents, un stage de recherche (que nous avons encadré) effectué dans notre laboratoire a focalisé sur le problème de l'adaptation de l'approche de modélisation par déclaration pour la génération d'éléments architecturaux moulurés [Rollandin, 2004].

Le système conçu est organisé en deux phases distinctes :

- *La description des propriétés de l'objet* : pour traduire ses intentions, le concepteur manipule le langage descriptif des effets qui nécessite un bon niveau d'expertise du domaine; la phase de description correspond au point d'entrée du modèleur déclaratif. L'utilisateur y décrit l'objet qu'il souhaite obtenir. Au-delà des spécificités relatives à l'interface utilisable pour l'insertion des termes de la description, la logique choisie s'appuie sur l'agrégation séquentielle de moulures formant un profil dans un ordre ascensionnel et en fonction des parties principales de l'objet. Pour mieux expliquer notre propos nous montrons l'exemple de l'élément balustre;
- *La phase de génération de l'objet* : elle produit un ensemble de solutions numériques au problème énoncé. Cette étape de production des solutions est assurée par l'ordinateur qui manipule ses propres raisonnements et les modèles utiles au calcul des solutions (leurs représentations interne et externe).

5.3.5.1 Exemples de modélisation par déclaration : le balustre et la base

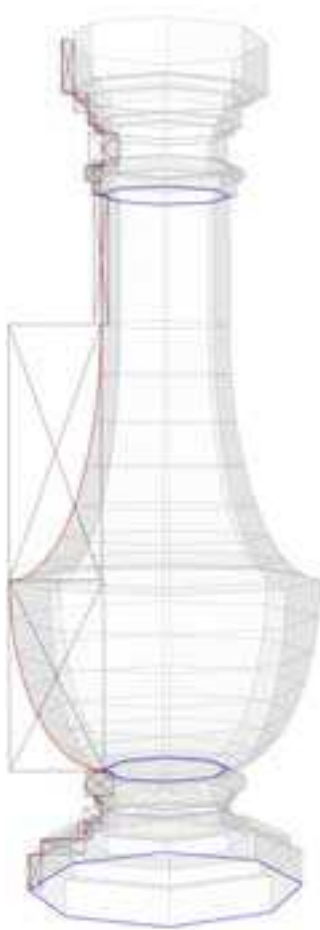


Figure 57. La modélisation de la déclaration d'une séquence d'atomes géométriques en révolution autour d'un axe central.

Le balustre est un petit élément vertical normalement divisé en trois parties (piédouche, corps et chapiteau) et dont la forme est basée généralement sur la rotation d'un profil autour d'un axe vertical (figure 57). Cette révolution peut présenter différents niveaux de lissage allant d'un profil horizontal carré, hexagonal, octogonal ou circulaire. Suivant les cas, des profils horizontaux différents peuvent représenter les différentes parties de l'élément. La description des moulures formant un profil vertical et des parcours d'extrusion sur chacune des parties qui le composent sont nécessaires pour sa construction géométrique. À partir de l'identification de cette simple structure, une énorme variété de balustres peuvent être décrites. Une étude approfondie sur cet élément est fournie par [Wittkover, 1968]. La procédure mise au point permet d'introduire en séquence les unités atomiques (sélectionnées sur une liste) de les déformer et de les regrouper en génératrices. En fonction de la complexité de l'objet à reproduire plusieurs profils générateurs sont ensuite associés aux profils directeurs. Dans la figure 58 nous présentons une variété de balustres générées automatiquement à partir d'une description séquentielle de moulures associées à un parcours type d'extrusion.

Pour le dimensionnement des unités atomiques trois stratégies sont envisageables :

- Introduction des attributs dimensionnels aux noeuds atomes en fonction des informations contenue dans la source documentaire ;

- Déformation des atomes et des parcours d'extrusion sur un support bidimensionnel (planche d'un traité d'architecture numérisée) ;
- Déformation manuelle en se basant sur l'exploitation d'une simple photographie de l'élément.

Cette dernière stratégie peut se révéler extrêmement efficace en absence de sources documentaires. Compte tenu des possibilités offertes par la déformation sous contraintes (présentée précédemment) le proportionnement précis de la primitive peut en effet être le résultat de la phase d'instanciation sur le nuage de points.

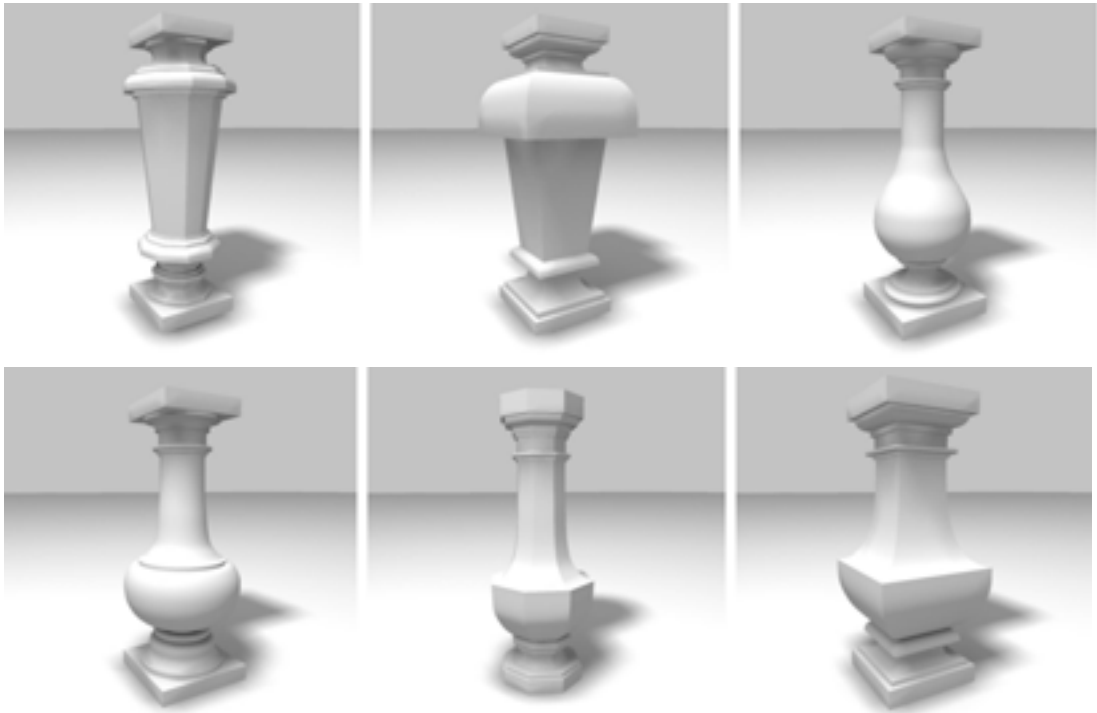
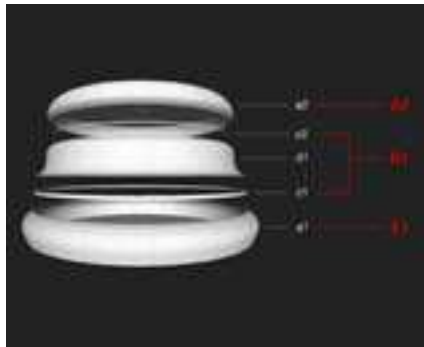


Figure 58. Six balustres modélisées par déclaration.

Une autre technique de modélisation peut utiliser une agrégation d'entités d'ordre supérieur, par exemple les moulures. Dans ce cas, les primitives géométriques de la modélisation sont des ensembles d'atomes géométriques déjà connectés en groupes. Ce type de modélisation par déclaration se révèle très efficace pour la construction géométrique d'entités sans s'appuyer sur une manipulation directe de la géométrie mais en utilisant une interface pour la construction à partir d'une déclaration en langage pseudo-naturel. Cette approche peut être appliquée à la modélisation d'éléments moulurés avec une forme très typée. Par exemple, la base est un élément caractérisé par une séquence de moulures en révolution autour de l'axe vertical: compte tenu de l'unicité de la fonction de génération de surface, sa modélisation peut résulter de la simple liste des moulures qui composent son profil vertical. Dans ce cas, on décrit la primitive en sélectionnant des termes du vocabulaire de l'architecte en fonction d'un découpage sémantique. Une procédure créera les atomes géométriques et les enchaînera en fonction de la séquence de sélection. La figure 59 illustre 3 bases modélisées à partir de la déclaration d'une séquence de moulures.

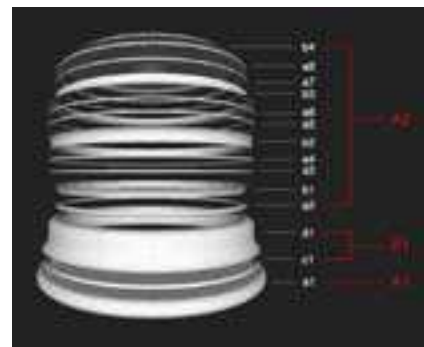


**Base à doucine
Corinthe, Great -Bath**

A1. *Tore inférieur*

B1. *Doucine renversée
sur Listel*

A2. *Tore supérieur*

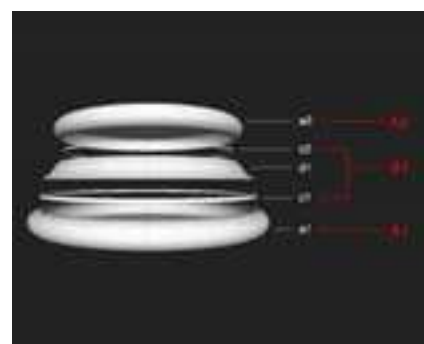


**Base à doucine
Delphes, Portique des
Athéniens**

A1. *Tore inférieur*

B1. *Doucine renversée*

A2. *Tore supérieur à
cannelures horizontales*



**Base à doucine
Corinthe, Remple de
Tyché**

A1. *Tore inférieur*

B1. *Doucine (à feuilles
imbriquées verticales)*

A2. *Tore supérieur*

Figure 59. Trois bases à doucine modélisées par déclaration de moulures.

5.3.6 Constitution d'une bibliothèque d'éléments

La modélisation déclarative offre une perspective intéressante par rapport à la possibilité d'organiser une bibliothèque d'éléments à partir de l'analyse des traités d'architecture ou de l'étude d'un objet particulier. Un des avantages les plus importants de cette approche réside dans la possibilité de séparer la description des éléments de leur représentation géométrique. Cela rend possible l'exploitation de la même description par différentes procédures d'interprétation géométrique. Cette approche assure d'un côté la possibilité de conserver les données indépendamment d'un langage de modélisation spécifique. En effet, plusieurs méthodes d'interprétation et de traduction géométrique des descriptions d'éléments pourront être étudiées dans un but d'exploitation des connaissances collectées. Dans le cas spécifique de notre développement, nous avons mis au point une solution pour le partage d'une bibliothèque

d'éléments basée sur l'interaction entre une base de données relationnelle et une procédure d'interprétation des données développées en PHP ². La procédure interprète les descriptions stockées dans la base en les traduisant en script de génération MEL.

5.3.6.1 Le stockage de primitives architecturales 3D

L'enregistrement dans la base de données organise la description en 3 blocs :

- Un bloc contenant les informations générales de la primitive, la date de création, l'auteur, etc. ;
- Un bloc pour les informations sur le support de description utilisé (sources documentaires, photographies, etc.), le fichier image de la source (optionnel), la référence à un thesaurus ;
- Un bloc contenant la description géométrique et paramétrique de l'entité.

Ce dernier bloc consiste en une table à 7 champs. Nous stockons actuellement les données en format BLOB ³ selon une structure préétablie (figure 60). Nous avons l'intention de reproduire entièrement cette structure en format XML ⁴.

atomes	directrices	génératrices	contraintes	surfaces	mouleurs	parties	profils
<i>enveloppe</i>	<i>n° séquence</i>	<i>n° séquence</i>	<i>atome bas</i>	<i>génératrice</i>	<i>nom</i>	<i>mouleurs</i>	<i>parties</i>
<i>origine</i>	<i>atome</i>	<i>atome</i>	<i>atome haut</i>	<i>directrice</i>	<i>atomes</i>	<i>dimensions</i>	<i>dimensions</i>
<i>ancrage</i>	<i>position</i>	<i>position</i>		<i>fonction</i>	<i>dimensions</i>		
<i>degré</i>	<i>orientation</i>	<i>orientation</i>		<i>degré</i>			
<i>points cont.</i>	<i>échelle</i>	<i>échelle</i>					
	<i>libertés</i>	<i>libertés</i>					

Figure 60. La structure de données pour la description géométrique et paramétrique d'une primitive.

Les données stockées dans ce bloc permettent la reconstruction tridimensionnelle complète de l'entité divisée en atomes géométriques, profils et procédures de modélisation. Chaque atome est décrit par sa position, son orientation et ses dimensions, les profils s'appuient sur la déclaration d'une séquence d'agrégation d'instances d'atomes. Le champ surface contient finalement les informations pour la modélisation géométrique en fonction d'un profil générateur et un profil directeur, du degré de la surface résultante et du type de fonction de génération. À ces champs s'ajoutent trois champs décrivant la description paramétrique selon une hiérarchie à trois niveaux : mouleurs/parties/profils.

5.3.6.2 Génération d'une primitive depuis un site distant

Une commande MEL permet d'introduire un navigateur Web à l'intérieur d'un élément d'interface. Ce navigateur permet d'atteindre une url et de recevoir des scripts MEL à partir d'une page HTML ou PHP. Le navigateur utilise Gecko ⁵ comme moteur d'affichage en employant Mozilla Open Source ⁶ pour visualiser les contenus Web. S'agissant d'une *fonction MEL*, cette

2. PHP. PHP : Hypertext Preprocessor. <http://www.php.net>

3. BLOB. Une valeur de type BLOB est un objet binaire de grande taille, qui peut contenir une quantité variable de données.

4. XML. Extensible Markup Language. <http://www.w3.org/XML>

propriété est supportée sur Windows, Mac OS X et Linux. Cela offre la possibilité d'exploiter les informations stockées dans une base de données à l'intérieur de notre environnement de reconstruction. La commande permet en effet de communiquer avec Maya en intégrant des commandes MEL à l'intérieur des balises de la page.

Par exemple la balise : `>mel://nurbsCube/>>cube
` crée un lien dans la page pour la génération d'un cube dans la fenêtre 3D.

Pour la génération automatique d'une primitive nous avons développé une procédure PHP qui interprète les données stockées dans la base et produit un script de génération MEL (figure 61). Une fonction de scan extrait les valeurs des champs BLOB du bloc description géométrique et paramétrique du résultat d'une requête dans la base.

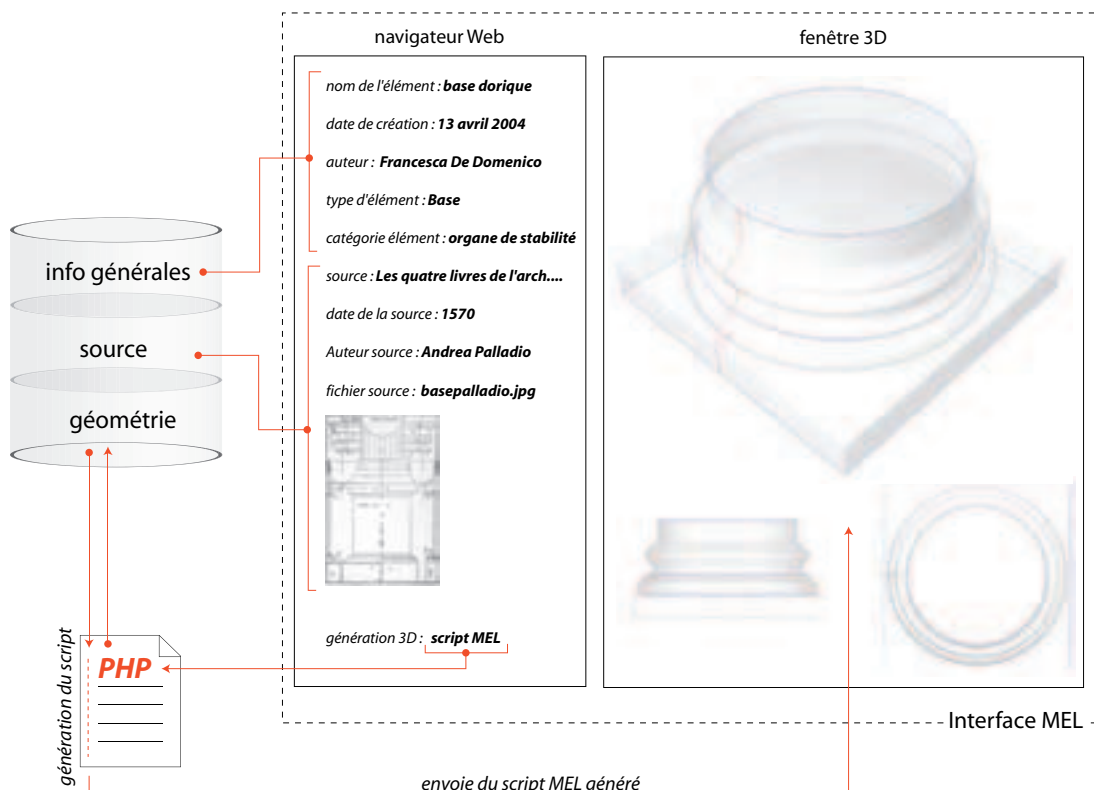


Figure 61. Schéma des relations entre la base de données et le modèleur 3D.

Cette procédure est basée sur 4 étapes :

Génération des atomes. Pour chaque ligne du champ, le script génère des nœuds atomes en assignant un identifiant et en récupérant les données concernant l'unité de mesure de l'enveloppe, les coordonnées du point d'origine et d'ancrage exprimées dans l'espace local de l'enveloppe, le degré de la courbe (linéaire ou cubique) et les trois points de contrôle de la courbe.

5. Gecko. <http://www.mozilla.org>

6. Mozilla Open Source. <http://www.mozilla.org>

Génération des profils directeurs et générateurs. Pour chaque ligne des champs directrice et génératrice, le script crée des instances des nœuds atomes, leur applique des transformations simples (translation, rotation et déformation) et bloque deux axes de rotation en fonction du plan de construction auquel l'atome appartient.

Génération des contraintes. À partir de la lecture de la séquence enregistrée dans le champ, la procédure connecte les attributs point d'origine et point d'ancrage selon l'ordre ascensionnel.

Génération des surfaces. Dans cette phase la procédure applique une fonction de modélisation (extrusion linéaire, combinée, courbe) à chaque atome appartenant à une séquence génératrice le long d'un profil directeur. Un attribut associé au type de fonction indique que la surface doit être fermée. Une fonction de remplissage est alors appliquée à la dernière courbe iso-paramétrique de la surface créée.

Génération de la description paramétrique. La procédure crée des groupes en fonction de l'organisation hiérarchique entre moules/parties/profils. Chaque groupe moule contient un ensemble d'atomes, chaque groupe partie contient un ensemble de moules, etc.

Une fois générées, les primitives gardent la structure des contraintes qui permet leur instanciation sur le nuage de points ainsi que leur utilisation pour le développement d'hypothèses restitutives. Compte tenu de la division entre les données et leur représentation, nous comptons développer des procédures pour la génération des primitives 3D pour d'autres systèmes de modélisation géométrique ou pour leur affichage par des moteurs 3D temps réel. D'ailleurs, au delà de la reconstruction tridimensionnelle, d'autres formes de représentation pourront être prises en compte comme par exemple la restitution bidimensionnelle des profils caractéristiques des primitives et la labellisation des moules issues de la phase de description sémantique. Ces informations pourrait être représentées dans des documents portables comme le PDF ⁷ ou par des langages graphiques vectoriels comme le SVG ⁸.

5.4 Reconstruction de bas-reliefs à partir d'un nuage de points systématique

5.4.1 Introduction

Dans les sections précédentes, nous avons montré les relations entre les informations pertinentes et une procédure de reconstruction tridimensionnelle. Par rapport aux éléments d'architecture, les éléments sculptés présentent des caractéristiques profondément différentes. Même si un grand nombre d'éléments typés (bases, chapiteaux) résultent d'une réalisation par sculpture, le cas des bas-reliefs est différent. En effet, si la technique de réalisation est la même, la liberté de réalisation est presque indépendante d'une théorisation. Les seuls éléments que l'on pourrait extraire d'une analyse géométrique d'un bas-relief sont le rite et les dimensions essentielles des motifs décoratifs. Par contre, si une analyse nous permet d'extraire les formes générales de l'objet aucune information concernant l'aspect de sa modélisation plastique est retenue. Même dans ce cas spécifique, où la construction géométrie et la sémantique ne peuvent intervenir pour l'interprétation de la forme, nous pensons qu'un code de représentation ou d'interprétation peut être introduit pour la compréhension de la forme. La technique actuellement la plus utilisée pour la reconstruction des décors sculptés

7. PDF. Portable Document Format. <http://www.adobe.fr>

8. SVG. Scalable Vector Graphics. <http://www.adobe/svg>

est le maillage automatique à partir d'un nuage de points systématique. La représentation géométrique résultante de cette phase ne fait que reproduire avec précision l'allure géométrique de la forme (en faisant abstraction des multiples zones d'ombre qui génèrent des trous dans le maillage). Si une surface maillée est sûrement un support important pour l'extraction d'informations comme la masse, ou pour l'étude approfondie des dégradations qu'une surface a subi dans le temps, elle reste loin d'être une représentation satisfaisante dans le domaine de la représentation architecturale. Comme on l'a vu dans la problématique de la restitution de la nature géométrique des éléments architecturaux, d'autres facteurs véhiculés par un code de représentation doivent intervenir pour conduire une analyse de la forme. Il s'agit, même dans ce cas là, d'extraire de la forme existante une intention de conception et non pas une simple reproduction de la réalité. Notre démarche de reconstruction des bas-reliefs démarre du constat suivant : ces éléments sont normalement appliqués à une surface dominante et donc à un plan bien défini. Le rôle qu'ils jouent dans la composition du bâtiment est donc de souligner une transition (décors sur les moulures), donner du rythme à un élément horizontal (le cas d'une frise), remplir des espaces entre des éléments courbes et droits (le cas des écoinçons aux côtés des arcs). Dans tous ces cas, la nature géométrique de ces éléments peut-être recherchée dans la façon dont ils composent un bas-relief (cadre, figures, motifs géométriques ou naturels) en se détachant du plan dominant. Ce type de lecture offre aussi une contrainte pour la phase de reconstruction qui peut simplifier la procédure de génération de la surface : en assumant un degré d'approximation dans la reconstruction de la surface, on pourrait décrire l'élément en prenant en considération exclusivement les distances de tous les points acquis en phase de relevé du plan sur lequel l'élément s'appuie. Cela constitue une réduction du problème de reconstruction qui peut jouer un rôle pour combler les parties manquantes (zone d'ombre) dans le nuage de points d'un bas-relief. En effet, quel que soit le dispositif utilisé, sa portée, ou sa précision, il est quasiment impossible de se retrouver dans des conditions de terrain permettant une acquisition complète sous plusieurs points de vue de l'élément sculpté. Comme différents articles le montrent [Curless, 1996 ; Pulli, 1999], ces conditions sont exclusivement réalisables en laboratoire et sur des objets de petite taille comme les sculptures. D'ailleurs même les recherches concernant le remplissage de trous montrent que ces processus peuvent être appliqués sur des petites portions de surface qui présentent des conditions de continuité [Davis et al., 2002].

5.4.2 Démarche adoptée

À partir de ces constats nous avons conçu une procédure pour la reconstruction approximative de bas-reliefs à partir d'un nuage de points systématique. Cette procédure est basée sur le tri des coordonnées du nuage en fonction d'un plan de référence. Les points sont ensuite colorés en fonction de leur distance du plan et d'une échelle de niveaux de gris. L'image-distance produite sert enfin de carte d'attributs de déformations d'une surface à maille régulières.

Pour la génération de la surface on considère six étapes distinctes :

Plan de génération. Dans cette phase on introduit un plan et on l'oriente selon les modalités expliquées dans la section concernant l'orientation du plan de rectification ou d'intersection (figure 62, a).

Génération de la carte de profondeur. La génération de la carte de profondeur consiste à calculer la couleur de chaque point du nuage en fonction de sa distance calculée sur la normale du plan de référence. L'attribut qui contrôle la couleur du nuage par particule est alors connecté

à un nœud ramp. Ce nœud permet de définir une échelle d'interpolation de valeurs colorimétriques. Dans notre cas, dans le but de créer une image de luminance nous utilisons une échelle de 255 niveaux de gris (figure 62, b).

Définition de la taille des points. Pour obtenir une représentation du nuage continue (sans espace entre les points) il est nécessaire d'établir une cohérence entre les informations spatiales (nuage 3D) et la carte de profondeur (image 2D). Pour cela nous discrétisons l'espace (u,v) du plan de génération en fonction de la résolution de l'image de profondeur à calculer. À partir du rapport entre la dimension du nuage sur une fenêtre de rendu et la résolution de l'image (choisie préalablement en fonction de la richesse d'informations présentes dans le nuage de points), nous calculons la taille (en pixels) de l'affichage d'un point. Cette valeur est ensuite assignée à l'attribut du système de particule qui contrôle cette propriété (figure 62, c).

Rendu de l'image de profondeur. L'image de profondeur est calculée à partir d'une caméra orthogonale orientée de façon parallèle au plan de génération. Une fois la première image de profondeur obtenue, une procédure optionnelle permet d'appliquer un filtre blur (adoucissement des frontières des couleurs adjacentes) à l'image dans le but de prévoir le lissage de la surface résultante avant sa génération (figure 62, d).

Définition d'une maille de déformation. Dans cette phase on définit le niveau de résolution de la surface en sélectionnant l'unité de la maille (figure 63). Les dimensions choisies constituent le paramétrage d'une surface plane NURBS qui récupère la position, l'échelle et l'orientation du plan de génération. Le plan est ensuite déplacé sur sa normale jusqu'au point du nuage le plus distant du plan de génération.

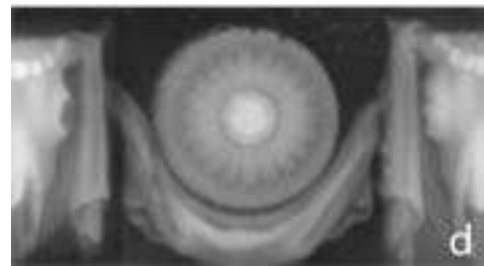
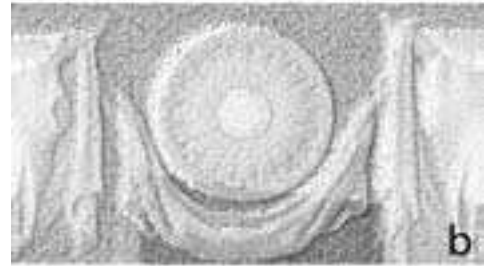


Figure 62. Génération de la carte de profondeur. Du haut vers le bas : projection du nuage sur un plan de génération, colorisation du nuage de points en fonction de la distance, définition de la taille d'affichage des points, application d'un filtre de lissage.

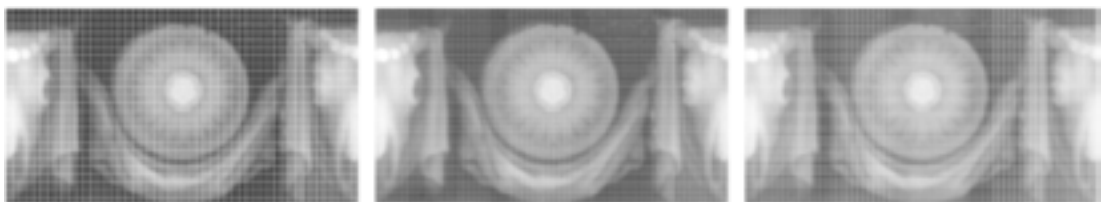


Figure 63. Définition de la maille de déformation de la surface en fonction d'un niveau de résolution.

Déformation de la surface paramétrique. Pour reconstruire la surface en fonction de la carte de profondeur nous utilisons une fonction de déformation qui utilise une image luminance comme carte de déformation. Une fois établies les correspondances entre les valeurs (u,v) de l'image et les coordonnées bidimensionnelles (x,y) du plan, chaque point de contrôle de la surface (points de la maille de déformation) est déplacé sur la normale au plan (z) en fonction du niveau de gris correspondant sur l'image. L'ampleur de cette translation est calculée en fonction du rapport entre l'échelle de niveaux de gris sur l'image et l'extension maximale du nuage de points par rapport à la normale au plan de génération (figure 64).

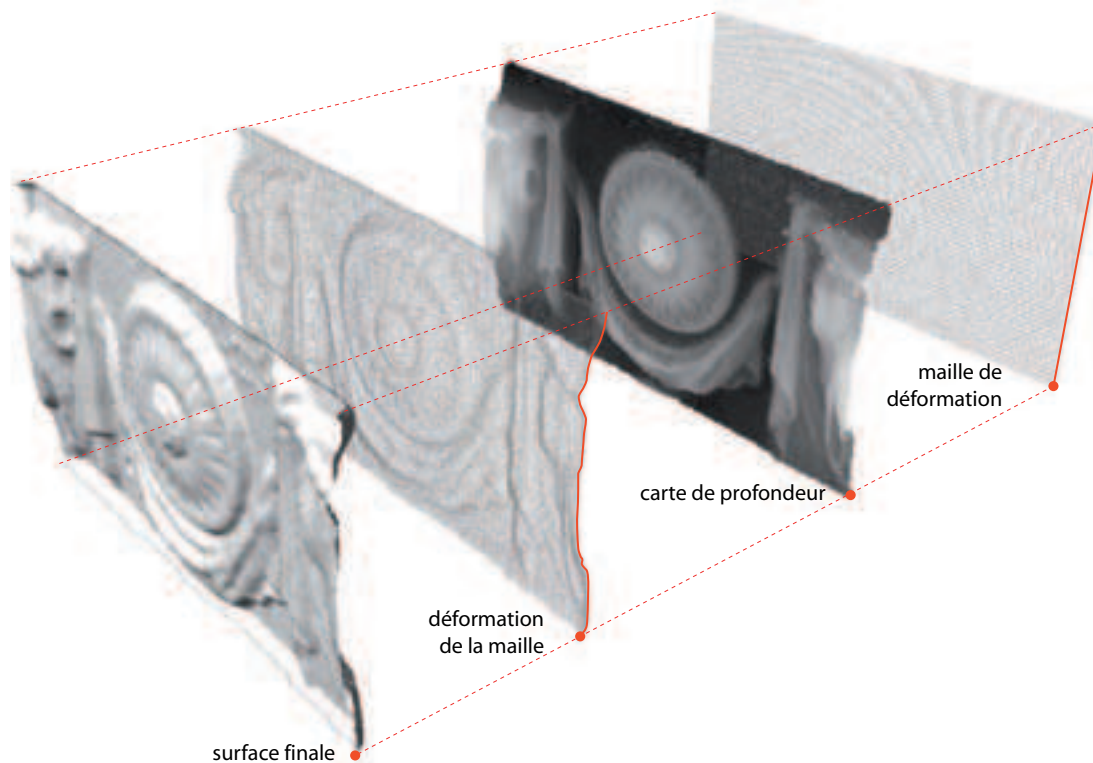


Figure 64. Reconstruction tridimensionnelle d'un bas-relief à partir d'une carte de profondeur.

5.4.3 Evaluation

Par rapport à une procédure classique de reconstruction par maillage automatique (section 2.2.2.1), la procédure mise au point est certainement moins précise. En effet, la discrétisation de l'image de profondeur ainsi que la génération de la surface en fonction d'une seule direction confine cette procédure dans la famille d'outils pour la reconstruction géométrique approximative. En revanche plusieurs qualités peuvent être observées dans une comparaison avec une surface obtenue par les procédures de maillage classiques :

- La génération de la surface est extrêmement rapide ;
- La surface obtenue ne présente pas de trous et est caractérisée par une maille uniforme ;
- L'opération de remplissage des zones d'ombre du nuage de points peut être conduite sur l'image (carte de profondeur) et non pas sur la surface ;
- La procédure permet le passage entre différents niveaux de résolution très rapidement ;

- Finalement, ce type de surface constitue un support idéal pour le plaquage d'images rectifiées à partir du même plan.

Une dernière remarque concerne l'efficacité d'une représentation d'un bas-relief en fonction d'un code de représentation (échelle de gris). La génération de la carte de profondeur extrait une information pertinente pour la compréhension de la nature géométrique de l'élément. Elle permet en effet la lecture de certaines caractéristiques de la surface (modélisation plastique des éléments sculptés) qui restent très difficile à saisir (souvent à cause des dégradation des matériaux) même en observant l'objet réel.

6. Structuration de la maquette et multi-représentation

6.1 Contexte

Intégrer un niveau purement géométrique avec un niveau sémantique de représentation des objets numériques 3D est un objectif très important. Cette problématique est d'ailleurs au centre du réseau d'excellence européen **aim@shape** (Advanced and Innovative Models And Tools for the development of Semantic-based systems for Handling, Acquiring, and Processing knowledge Embedded in multidimensional digital objects) ¹. L'objectif aujourd'hui est de considérer la génération d'objets dans lesquels les connaissances et la sémantique soient explicitement représentées et puisse effectivement être récupérées, partagées, exploitées. Le cœur de cette intégration réside dans l'homogénéisation des approches de modélisation des formes et de leur sémantique associée en utilisant des mécanismes de formalisation des connaissances. En particulier les ontologies qui fournissent les règles pour lier la sémantique à la forme ou aux parties de la forme [Falcidieno et al., 1998]. Le concept de forme numérique entoure en effet toutes les instances de l'objet qui peuvent être représentées dans un contexte numérique, indépendamment de leur format, utilisation, dimension, en considérant qu'elles ont une nature géométrique caractérisée par leur extension spatiale. Les éléments architectoniques ont une forme (extension spatiale), ils peuvent être décrits par des structures (collections d'entités et décomposition parties-ensemble), ils ont des attributs qualitatifs (couleurs, textures, termes, etc). Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la définition d'une méthode pour associer la sémantique aux formes architecturales. Cela impose avant tout de considérer l'édifice comme système de connaissances architecturales, ensuite d'en extraire un modèle de description, enfin de définir les possibles représentations de sa forme en fonction de plusieurs objectifs d'analyse.

6.1.1 L'édifice comme système de connaissances architecturales

Un système de connaissances architecturales peut être décrit comme une collection d'objets structurés identifiés par un vocabulaire précis [Quinrand, 1985] [Mitchel, 1990]. C'est ce que proposent les quatre livres de [Palladio, 1570], qui expliquent comme les parties d'un édifice composent l'ensemble bâti. Plusieurs recherches se sont concentrées sur le développement de classifications d'éléments architecturaux classiques à la fois dans des cadres de développements théoriques ou d'application à la modélisation géométrique :

[Tzonis et al., 1986] divisent différentes représentations de l'espace architectural en fonction de leur niveau d'abstraction :

- Le niveau le plus abstrait est le *clustering level* (niveau de groupe) dans lequel l'objet est décrit en termes d'activités, personnes, localisations ;

1. AIM@SHAPE. <http://www.aim-at-shape.net>

- Le second est le niveau topologique, qui concerne la manière selon laquelle les différentes entités sont reliées les unes aux autres ;
- Le troisième est le niveau métrique, qui décrit la manière selon laquelle les entités occupent l'espace euclidien, leur forme et mesure.

Cette logique a été reprise par [Mitchell, 1990] pour la construction de modèles à partir de l'analyse et de la composition formelle et structurelle d'objets architecturaux (et du vocabulaire qui les dénomme) en organisant spécialisations hiérarchiques et classification d'agrégation. L'auteur produit un traitement systématique des fondements logiques de la conception classique. À partir d'une discussion détaillée sur les langages des formes architecturales, leur spécification au travers d'une grammaire formelle, leur interprétation et leur rôle dans la composition, Mitchell considère d'abord comment les bâtiments doivent être décrits en mots et montre comment certaines descriptions peuvent être formalisées par la notation de calculs de prédicats de premier ordre. La technique de la grammaire de forme, en analogie avec la grammaire combinatoire des mots dans le langage naturel, construit les édifices au travers d'une substitution récursive de formes symboliques. Cela requiert un état de départ et un groupe de règles formelles pré-définies. L'effet fondamental de la grammaire de la forme est qu'elle détermine une structure pour explorer les possibilités de la configuration formelle. Dans cette optique [Gaiani, 1999] a conduit la modélisation sémantique complète des ordres classiques à partir d'une analyse du traité de Palladio et en utilisant une logique qui n'appartient pas aux stratégies de polygonisation, mais qui est plutôt liée à une méthodologie qui se base sur l'élément architecturale comme système primitif. La base du système a été posée à partir de la notion de structure de [Levi-Strauss, 1958] :

- Premièrement, une structure présente le caractère d'un système. Elle consiste en éléments tels qu'une quelconque modification de l'un d'eux, engendre une modifications de tous les autres ;
- Deuxièmement, chaque modèle appartient à un groupe de transformations, chacun correspondant à un modèle de la même famille, de façon à ce que l'ensemble de telles transformations constituent un groupe de modèles ;
- Troisièmement les propriétés identifiées ci-dessus permettent de prévoir comment le modèle réagira, dans le cas d'une modification de l'un de ces éléments ;
- Enfin, le modèle doit être construit de façon à ce que son fonctionnement puisse expliquer tous les faits observés.

Dans cette expérience, chaque élément, créé par connexions de primitives simples et produit par plusieurs polygones, a été décrit dans une base de donnée (SBD – Scene Block Diagram) contenue dans le logiciel de modélisation utilisé (Alias). Différents éléments de base sont reliés en groupes de niveau supérieur (colonnes, ordres, etc.) et organisés en calques.

6.1.2 Les relations entre les éléments architecturaux

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu qu'un élément d'architecture classique résulte généralement des combinaisons de sous-parties exprimées au travers de relations géométriques et topologiques. Mais la description de la structuration de ces éléments dans un ensemble ordonné nécessite l'observations d'ordre plus complexe. [Goulette, 1999], identifie trois types de relations entre les éléments que l'on peut lire dans le vocabulaire de l'architecte :

Les relations topologiques. Il s'agit des relations qui expriment le positionnement relatif d'un élément, ou d'une partie d'élément, à l'intérieur d'un dispositif unitaire. Ces types de relations dépassent souvent le cadre d'une géométrie classique pour faire appel à des aspects qualitatifs.

Les relations partie-ensemble. Comme nous l'avons déjà vu, la description d'un bâtiment peut être conduite par regroupement d'éléments simples en un tout unitaire ou en ensembles ordonnés. Ces relations expriment l'organisation hiérarchique que l'on peut lire dans la composition d'un édifice : les éléments sont parties d'un tout homogène, lui-même pouvant être partie d'une unité d'ordre supérieur.

Les relations de composition. Il s'agit de schémas de composition reposant sur un ensemble de règles contrôlant le positionnement et le dimensionnement relatifs d'un ensemble d'éléments dans un tracé géométrique général.

Nous concentrons notre attention sur les relations partie-ensemble car les autres types de relations concernent plutôt les problèmes de composition architecturale et non pas l'analyse d'édifices existants où ces relations sont déjà explicites.

Les relations partie-ensemble expriment des logiques de structuration hiérarchique d'une composition architecturale. L'établissement de ces relations peut s'effectuer dans l'espace d'un édifice et avoir comme but d'exprimer les structures hiérarchiques que l'on peut lire dans sa composition. Elles peuvent aussi répondre à des logiques de regroupements basées sur des critères de classification. En fonction d'une logique de découpage ou d'un point de vue de regroupement, l'analyse peut être conduite au travers d'observations d'ordre topologique, fonctionnel ou typologique. Par rapport à ces critères nous distinguons trois types de relations partie-ensemble : morceau-tout, membre-collection, composant-assemblage.

Les relations morceau-tout. Les relations morceau-tout expriment la façon dont les sous-parties d'un objet sont organisées pour former un élément unique. Les traités d'architecture offrent normalement un ensemble de terme pour chaque sous-partie de l'élément. Ce découpage, correspond parfois à des véritables divisions physiques de l'objet, et dans d'autres cas, il fait référence aux transitions géométriques que la forme exprime. La figure 65 montre les relations

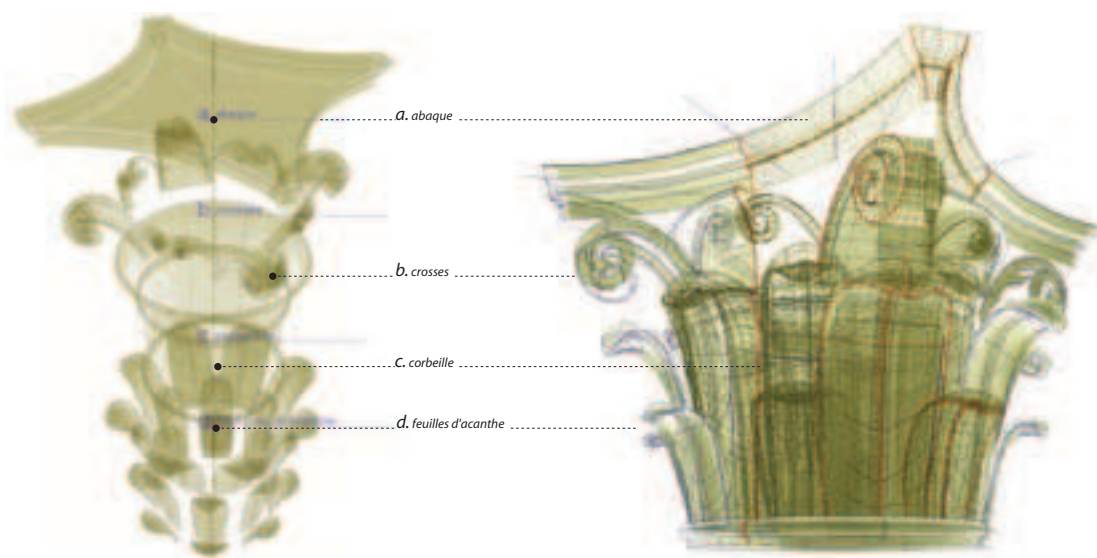


Figure 65. Les relations morceau-tout dans un chapiteau d'ordre corinthien.

morceau-tout d'un chapiteau d'ordre corinthien.

Les relations membre-collection. Ces types de relations sont à la base des classifications typologiques. Par rapport à l'identification d'un type, ces relations peuvent regrouper les éléments en catégories en fonction de critères de comparaison. En architecture, ces classifications s'appuient normalement sur l'étude des courants stylistiques liées aux périodes historiques ou aux régions géographiques. La figure 66 classe différents types de l'élément *base*.

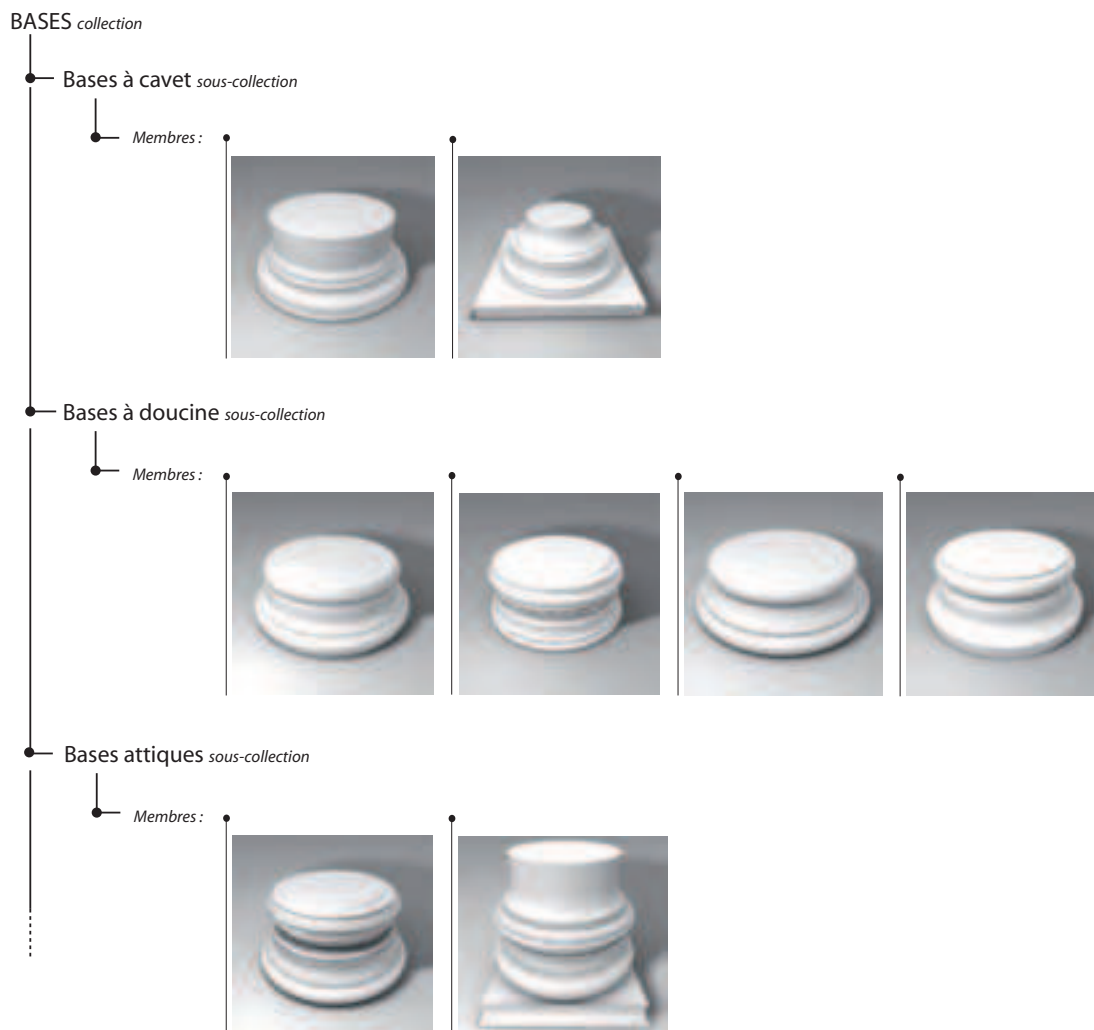


Figure 66. Relations membre-collection dans une classification de bases.

Les relations composant-assemblage. Il s'agit des relations qui caractérisent la logique de présentation des traités d'architecture classique. Elles expriment les ensembles architecturaux en fonction d'une logique fondée sur l'analyse de la composition de l'édifice. La composition d'ensembles « harmonieux » est conduite par des principes d'ordonnement comme les proportions, le rythme et la symétrie. À titre d'exemple nous présentons ci-dessous une analyse composant-assemblage du modèle théorique du front de la scène d'un théâtre romain de période augustéen (figure 67).

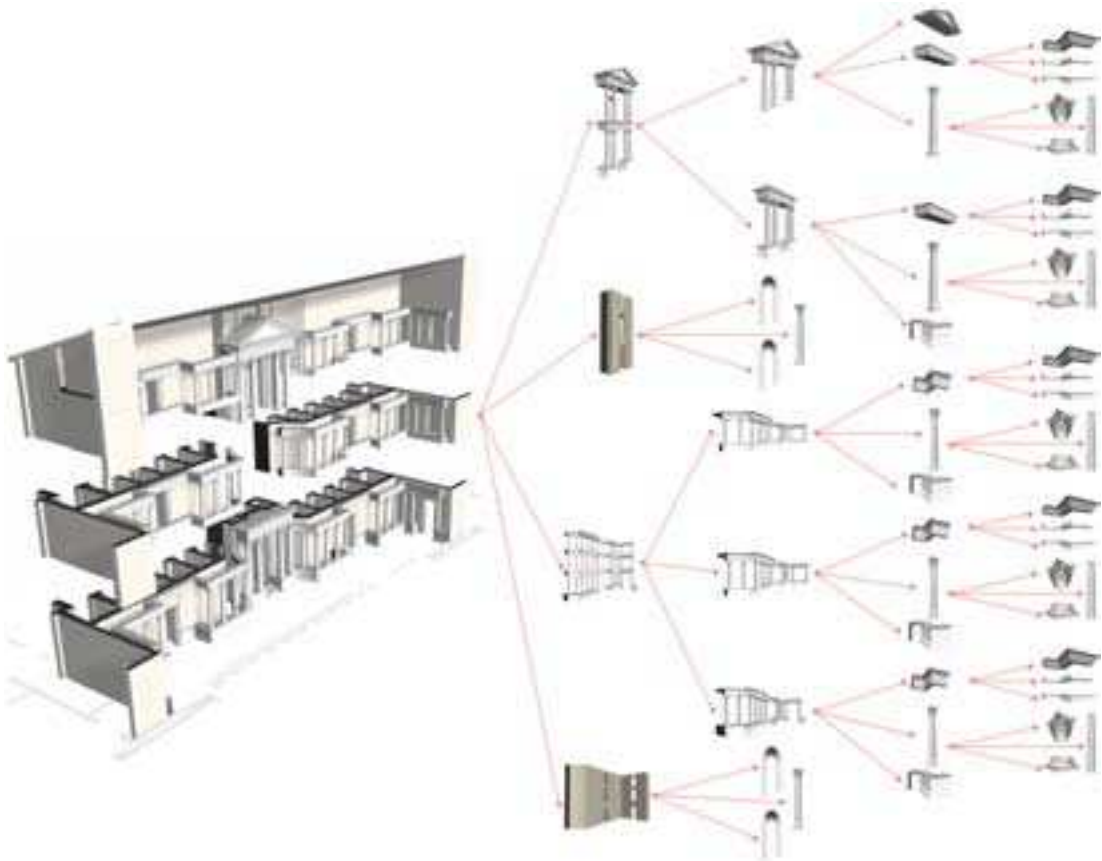


Figure 67. Relations composant-assemblage dans un modèle théorique de théâtre romain de période augustéen.

6.2 Description sémantique de la morphologie d'un édifice

Dans les recherches que nous venons de citer, il est évident que la logique des décompositions sémantiques d'un édifice est toujours contrainte à la description de modèles théoriques. Ces approches sont en effet fondées sur la structuration de formes symboliques. L'objectif de cette partie de notre travail consiste à ajouter une couche sémantique à la description de la morphologie d'édifices existants. [Blaise, 2003] a montré que pour l'analyse architecturale, les approches de classification *par intension* (association d'un modèle théorique à un élément réel) sont incompatibles avec les exigences de l'étude du patrimoine construit, alors que des approches *par extension* (extraction et groupage de descripteurs communs à plusieurs éléments) semblent plus pertinentes. L'élément d'architecture, en tant que forme symbolique, appartient en effet principalement au domaine de la représentation mentale [Goulette, 1999] : c'est un objet abstrait pour penser et concevoir un projet d'architecture. Le vocabulaire de l'architecte organise en effet le bâti selon une structure signifiante qui n'est pas seulement caractérisée par une apparence visuelle ou une nature géométrique. De plus, il faut remarquer que les connaissances qui interviennent dans



Figure 68. Ambiguïtés entre le vocabulaire de l'architecte et les divisions physiques des éléments réalisés.

un découpage sémantique de la morphologie d'un édifice sont toujours relatives à un objectif d'analyse. À titre d'exemple, dans la figure 68, la logique de découpage selon le vocabulaire de l'architecte est en contraste avec les divisions entre les unités physiques qui composent l'objet : les divisions entre la base, le fût et le chapiteau dans la colonne ne coïncident pas avec les frontières physiques des éléments. L'*astragale* et l'*apophyge*, qui pour le vocabulaire de l'architecte constituent les extrémités du fût de la colonne, dans l'édifice réalisé, font partie respectivement du chapiteau et de la base (probablement à cause de problèmes de réalisation). Ce type d'ambiguïté explique bien les difficultés qu'une description sémantique peut rencontrer dans un cadre de structuration d'entités tridimensionnelles d'édifices. Cela souligne le besoin de conduire un découpage morphologique en fonction d'un vocabulaire précis utilisé par une analyse spécifique. La figure 69 montre deux décompositions du même objet élaborés conduites en fonction de deux objectifs différents : l'analyse du vocabulaire de l'architecte et celle des matériaux de construction.

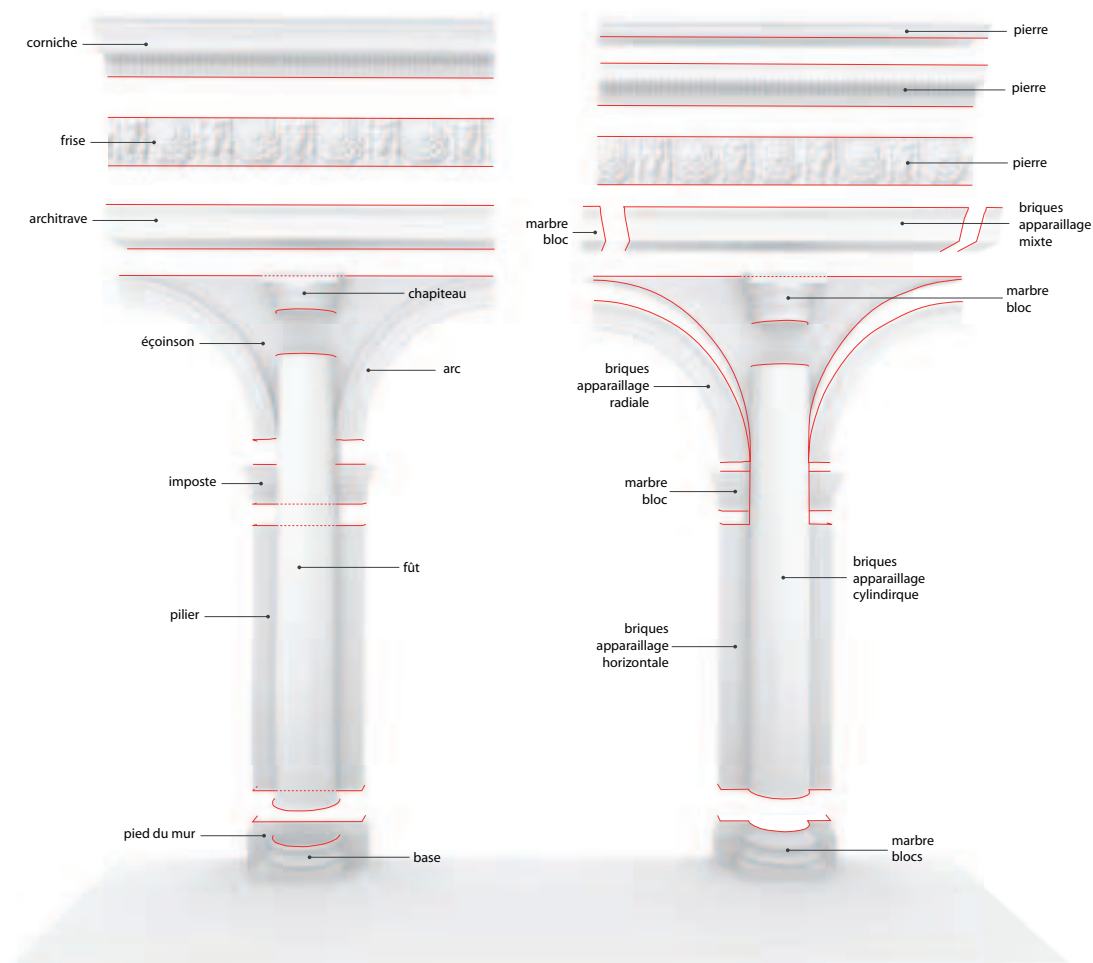


Figure 69. Découpages morphologiques de l'objet élaborés en fonction de deux analyses différentes.

6.2.1 La description sémantique par graphes tridimensionnels

Dans le but de concevoir un cadre méthodologique pour la représentation d'édifices basée sur leur description sémantique, nous introduisons la notion de *point de vue* comme

concept déterminant la structuration de la maquette. La notion de point de vue comprend trois aspects :

- L'utilisation d'un vocabulaire pour isoler des éléments ;
- L'identification d'une logique pour le regroupement de ces éléments dans un ensemble cohérent ;
- Le choix d'un type de représentation capable d'extraire de la forme les informations nécessaires à l'analyse.

En accord avec les principes introduits par [Falcidieno et al. 1998], nous construisons autour de la morphologie de l'édifice un modèle de description défini par trois niveaux distincts : sémantique, structure, représentation.

Dans cette optique nous distinguons trois phases pour passer de la restitution de la morphologie de l'objet à ses représentations possibles. Une première phase (niveau sémantique) consiste à isoler des concepts (termes de la description) et à lui associer des parties de la forme. La seconde phase (niveau structurel) permet d'établir un graphe de relations entre ces concepts pour organiser les éléments de la scène par rapport à une exigence de description. Le dernier (niveau de représentation) permet d'associer à chaque concept isolé une ou plusieurs représentations.

Comme nous le verrons, cette division offre une liberté importante dans l'exploitation des données issues du relevé de l'édifice car, à partir du même modèle géométrique de la morphologie, on peut élaborer différentes descriptions sémantiques qui exploitent un système multi-représentations. Comme nous nous intéressons principalement à la documentation graphique du patrimoine bâti, la notion de point de vue coïncide alors avec celle d'objectif de la représentation. D'ailleurs, comme nous le verrons dans le chapitre 7, le modèle de description de l'édifice n'est pas seulement utilisé pour la structuration de la maquette tridimensionnelle, mais il peut devenir le dénominateur commun pour l'établissement de relations bilatérales entre morphologie de l'objet et informations hétérogènes.

6.2.1.1 Le découpage morphologique

Le découpage morphologique consiste à organiser les éléments de la scène selon une structure à compartiment dans laquelle on associe de la géométrie à chaque concept. Cette opération est conduite par groupage d'éléments et par union/division de surfaces paramétriques. Dans le cas du groupage, un nœud *transform* (entité sans géométrie) est utilisé comme *élément père* d'un ensemble de sous-parties (entités avec géométrie). Tandis que dans le cas où, des séparations ou des unions d'éléments sont requises, nous exploitons les propriétés des surfaces NURBS générées dans la phase de reconstruction 3D. On extrait des courbes isoparamétriques

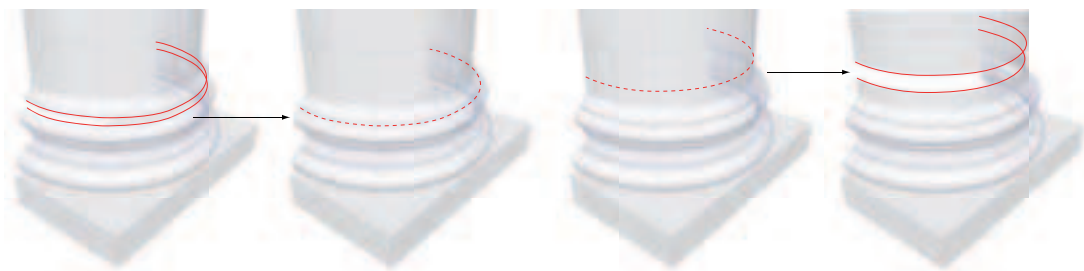


Figure 70. Union et division de surfaces.

sur les surfaces et on les utilise pour diviser ou joindre des éléments. Dans le cas d'une jonction, la procédure connecte les surfaces à partir de deux courbes isoparamétriques sélectionnées aux extrémités des deux surfaces d'entrée. Dans le cas d'une division, la procédure sépare la surface sélectionnée en deux parties en fonction d'une courbe isoparamétrique sélectionnée (figure 70).

6.2.1.2 Le graphe de description

Pour supporter la phase de description sémantique de la morphologie de l'édifice, nous utilisons une représentation symbolique, dans l'espace 3D, des relations (partie/ensemble) établies entre les éléments isolés. Nous nous inspirons de la logique de structuration introduite par [Heine, 1999]. Il s'agit d'un graphe 3D (arborescence dans l'espace) dont la configuration dépend de la manipulation (relations hiérarchiques) d'un ensemble de termes dans une liste

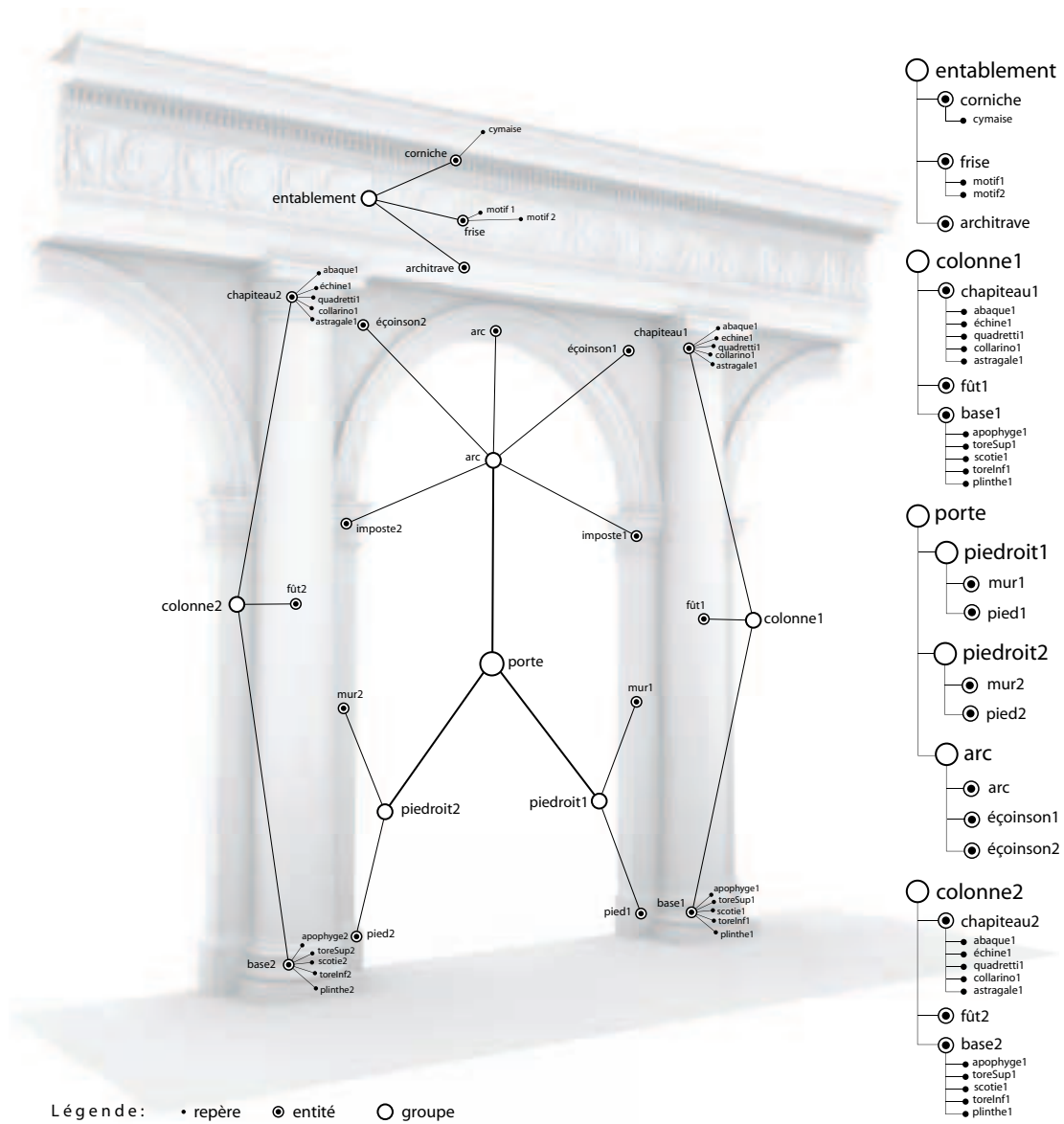


Figure 71. Graphe de description sémantique de l'édifice.

(figure 71). Nous établissons ce graphe à l'aide de nœuds que nous avons spécifiquement définis : *entité morphologique*, *groupe finalisé*, *repère*.

Une *entité morphologique*, qui résulte d'une décomposition morphologique, constitue un concept identifié par l'utilisateur pour la description de l'édifice qui peut être associé à une ou plusieurs représentations géométriques.

Un *groupe finalisé* est un nœud qui regroupe des *entités morphologiques* et qui n'a pas de représentation géométrique propre. Son extension spatiale résulte en effet de l'union des enveloppes englobant les entités qui lui appartiennent.

Un *repère* indique un aspect particulier à l'intérieur d'une entité. Par exemple une moulure d'un élément ou un aspect particulier sur la surface de l'entité (personnage historique d'un bas-relief, dégradation du matériau, etc.).

Une fois la phase de décomposition terminée une procédure automatique produit une première description en associant à chaque concept isolé un nœud *entité morphologique* dans une liste de termes et en générant le symbole correspondant dans l'espace 3D. Ce symbole est situé au barycentre de l'enveloppe englobant l'entité. L'utilisateur peut alors organiser hiérarchiquement les entités sur la liste de termes (figure 71) en introduisant des nœuds *groupe finalisé* ou *repère*. La création d'un groupe correspond à la création d'un concept qui réunit un ensemble d'entités : dans le graphe un symbole 3D est alors créé au barycentre de l'enveloppe englobant toutes les *entités morphologiques* sélectionnées. La création d'un *repère* est au contraire conduite manuellement en sélectionnant dans l'espace 3D un point sur la surface d'une *entité morphologique*. La correspondance établie entre un éditeur (liste de termes) et la manipulation des entités dans l'espace permet de conduire la structuration hiérarchique dans la scène 3D et/ou dans la liste d'entités. La représentation des relations dans l'espace est en effet calculée en temps réel par une procédure qui génère une chaîne de liaisons 3D en fonction de la lecture des niveaux hiérarchiques exprimés dans la liste des termes.

La séparation introduite entre le niveau sémantique, structurel et de représentation, permet d'exploiter le même ensemble d'*entités morphologiques* pour créer différents graphes de description. Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, les choix de regroupement des entités répondent en effet à des exigences multiples.

6.3 Multi-représentations

Dans cette partie, nous nous focalisons sur la dernière dimension prise en compte pour la description de l'édifice : sa représentation géométrique. Différentes recherches se concentrent aujourd'hui sur les multi-représentations d'entités géométriques dans différents domaines. Parmi ces travaux, certains sont appliqués à la cartographie [Spaccapietra et al., 2000]. Dans ce cas, les multi-représentations d'entités bidimensionnelles sont exploitées pour garantir un niveau d'information graphique adéquat à une échelle donnée. D'autres exploitent les multi-représentations pour structurer différents niveaux de complexité polyédrique en fonction des différentes exploitations de la même maquette 3D [Léon, 1997]. Toutes ces expériences organisent plusieurs représentations du même objet en s'appuyant toujours sur la même base géométrique (vecteurs 2D ou polygones 3D). La différence parmi les multiples représentations concerne donc la quantité d'informations géométriques qu'elles contiennent. Or, dans l'état de l'art de ce manuscrit, nous avons montré que l'analyse d'édifices du patrimoine peut se servir de techniques de représentation qui exploitent différentes bases géométriques : nuages de points, modèles filaires, ou polyèdres. Il est alors important d'introduire une distinction

entre les notions de résolution et de représentation : une représentation résulte d'une technique d'élaboration qui permet de décrire la forme d'un objet en fonction d'une base géométrique et d'un niveau de résolution.

La phase de structuration de la maquette que nous avons présenté dans le paragraphe précédent permet d'organiser différentes représentations autour de la même *entité morphologique* en fonction de différents objectifs de description. À partir de trois bases géométriques (points, courbes, polyèdres), dans les paragraphes qui suivent, nous classifions différents types de représentations en mettant l'accent sur :

- Le type de description qu'elles permettent ;
- Les techniques nécessaires à leur élaboration ;
- Les informations qu'elles véhiculent.

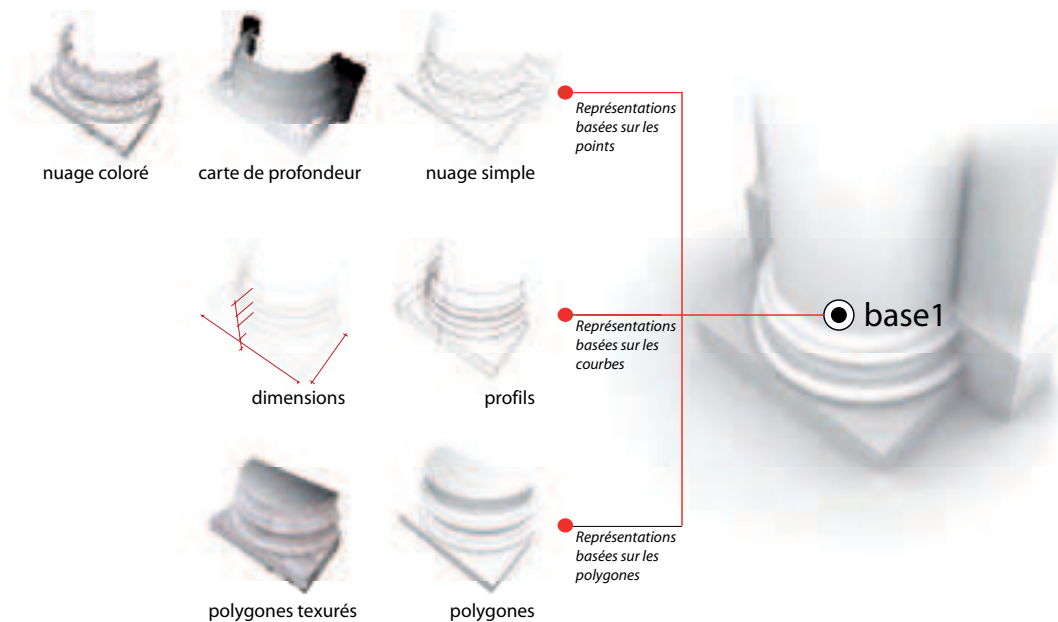


Figure 72. Représentations multiples organisées autour d'une entité morphologique.

Pour chaque catégorie de représentation, nous présentons les procédures spécifiques que nous avons développées. Ces procédures permettent une génération automatique, semi-automatique, ou manuelle de représentations multiples de la même *entité morphologique* sélectionnée dans le graphe de description de l'édifice (figure 72).

6.3.1 Représentations basées sur les points

Cette catégorie utilise des points éventuellement enrichis par des attributs de couleur. Des représentations basées sur ce type de rendu peuvent contenir les informations brutes issues d'un scanner laser ou d'une restitution photogrammétrique. Elles constituent le support idéal pour effectuer des mesures car il s'agit de représentations fidèles aux données saisies en phase de relevé sans aucune approximation ou interprétation. De plus, la possibilité d'associer des valeurs RVB ou des *sprites* (de taille fixe ou dynamique) sur chaque coordonnée constitue une solution alternative au rendu par polygones, toujours plus lourde en affichage [Kobbelt et al., 2004].

Pour l'élaboration de ces types de représentations, nous proposons trois procédures distinctes. La première permet de segmenter le nuage de points en fonction d'un découpage morphologique. La seconde et la troisième permettent d'enrichir les nuages de points segmentés par l'assignation d'attributs de couleurs extraits à partir d'une carte de profondeur ou d'une photographie orientée. Les représentations issues de ces procédures sont stockées dans des noeuds spécifiques qui organisent autour de la géométrie des informations supplémentaires produites par les procédures de génération.

6.3.1.1 Segmentation du nuage en fonction d'un découpage morphologique

Cette procédure segmente automatiquement le nuage de points d'entrée en fonction de l'enveloppe englobant l'*entité morphologique* sélectionnée dans graphe de description (figure 73). La procédure est basée sur 3 étapes :

- Récupération des vecteurs d'extrémité de l'enveloppe englobant l'entité sélectionnée ;
- Tri des points du nuage par comparaison des coordonnées (x,y,z) avec l'extension spatiale de l'enveloppe: les seules coordonnées comprises dans l'enveloppe englobant sont retenues ;
- Génération d'un nuage reproduisant les points triés.

Compte tenu que l'enveloppe de l'*entité* est un parallélépipède (bounding box) et qu'il est orienté par rapport au repère global de la scène, des outils pour la sélection de partitions sur le nuage ont été conçus pour éliminer rapidement des points non désirés.

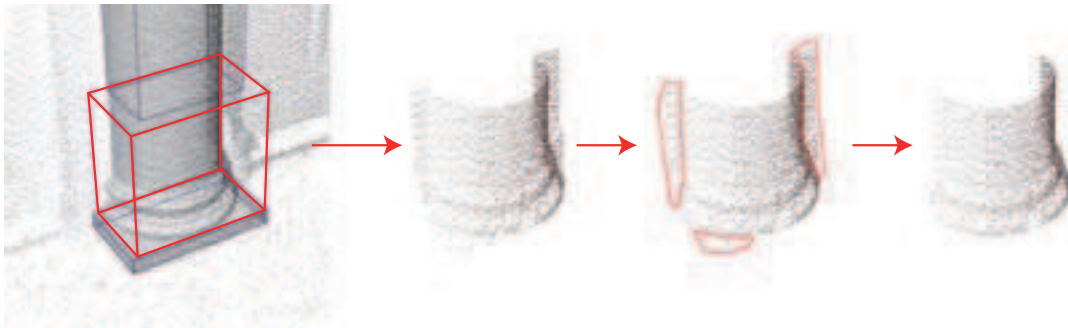


Figure 73. Segmentation du nuage de points en fonction de l'extension spatiale d'une entité morphologique.

6.3.1.2 Cartes de profondeur

Pour l'élaboration d'une carte de profondeur, nous utilisons une procédure similaire à celle présentée dans la section (5.4.2). La procédure utilise un nuage segmenté et un plan (orientable dans l'espace) en entrée et est basée sur 4 étapes.

- *Définition de l'échelle et de l'orientation d'un plan de référence.* Cela peut être établi automatiquement en récupérant les coordonnées des extrémités du nuage de points sur les trois axes, ou par une manipulation interactive d'un parallélépipède dans l'espace.
- *Définition d'un intervalle de profondeur* en fonction de la distance entre le point du nuage le plus proche et le plus distant du plan de référence.

- *Définition d'une échelle de couleur* pour la génération de la carte. Pour cette phase nous utilisons un nœud *ramp*. Ce nœud crée une interpolation entre deux ou plusieurs valeurs colorimétriques.
- *Création d'une fonction d'interpolation linéaire* calculant la couleur de chaque point du nuage en fonction de sa distance du plan. Ce calcul compare pour chaque point la distance relative du point avec la profondeur totale et extrait la valeur colorimétrique correspondante sur un intervalle de 255 couleurs dans le nœud *ramp* (figure 74).



Figure 74. Carte de profondeur calculée sur le nuage de points d'un groupe (*La marseillaise*) ornant l'arc de triomphe, place de l'Etoile à Paris.

Le nœud *carte de profondeur* contient, en plus des valeurs RVB pour chaque point, la distance métrique indiquant la profondeur de la représentation.

6.3.1.3 Colorisation du nuage de points

Cette procédure utilise un nuage de points et une photographie orientée comme entrées et consiste à assigner à chaque point du nuage l'attribut couleur provenant de l'image. La procédure est basée sur 2 étapes.

- Récupération de la matrice de la caméra associée à l'image sélectionnée.
- Pour chaque point du nuage :

- On exprime sa position dans l'espace du plan d'image associé à la caméra en multipliant le vecteur de position par la matrice de la caméra ;
- On récupère la valeur colorimétrique de l'image associée au plan d'image de la caméra aux coordonnées UV identifiée dans l'étape précédente ;
- On assigne la valeur RVB à l'attribut couleur du point (figure 75).



Figure 75. Coloration du nuage de points d'un élément de décor à partir d'une photographie orientée. Hôtel de Sully, Paris.

En ce qui concerne les informations associées au noeud, cette représentation conserve le chemin (URL) vers le fichier de la photographie utilisée pour la coloration. Cette information sera ensuite exploitée pour créer un lien entre la représentation et la photographie stockées dans la base de données.

6.3.2 Représentations basées sur les courbes

Les représentations s'appuyant sur cette base géométrique peuvent contenir les informations extraites en phase d'analyse de la forme (par exemple les profils significatifs, les contours de zones, etc.) ou les courbes paramétriques des surfaces reconstruites. Comme on l'a vu dans la partie concernant la modélisation basée sur les connaissances architecturales, seule une lecture par profils permet de comprendre la nature géométrique de l'objet d'architecture. Par conséquent ce type de représentation est particulièrement adapté à la description des formes architecturales. Elle constitue de plus un support efficace pour la structuration d'informations dimensionnelles. Pour la génération des représentations basées sur les courbes nous exploitons

les propriétés des surfaces NURBS utilisées pour la restitution de la morphologie de l'édifice. Ces surfaces permettent d'extraire des profils tout au long de leur espace paramétrique en deux directions (u,v). Cette propriété peut alors être exploitée pour extraire les contours des surfaces de l'entité ou d'autres profils sélectionnés sur la surface.

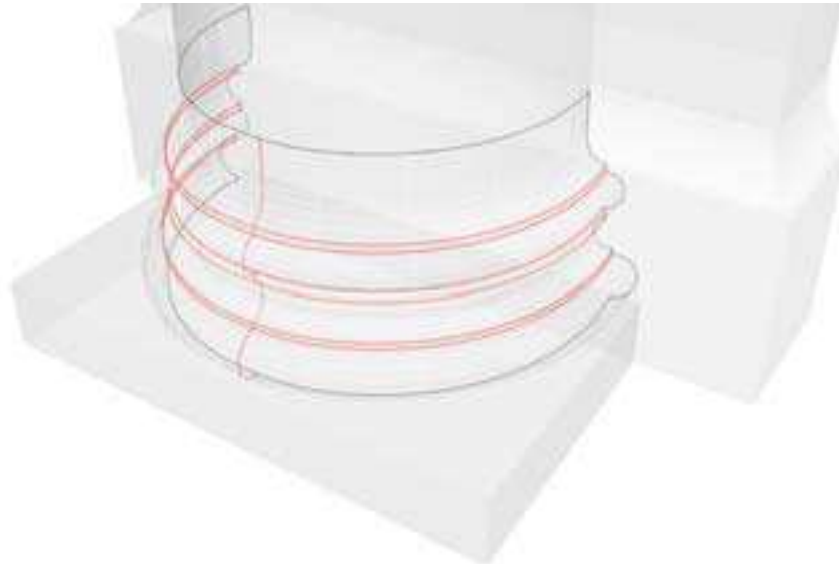


Figure 76. Extraction automatique (en noir) et semi-automatique (en rouge) de profils significatifs.

6.3.2.1 Extraction automatique et semi-automatique de profils caractéristiques

Pour l'extraction des profils caractéristiques, nous proposons deux procédures distinctes. La première est complètement automatique et extrait des courbes définissant les contours de la surface. Cette procédure reconstruit quatre courbes sur les frontières de la surface (UV). La seconde est une procédure manuelle qui exploite la fonction *selectIsoparm* et qui permet de déplacer un curseur le long de la surface dans les deux directions, et d'extraire un profil particulier (figure 76).

6.3.2.2 Extraction d'informations dimensionnelles

À partir de l'ensemble des profils extraits du nuage de points ou de la surface de l'objet reconstruit, il est possible d'extraire des informations dimensionnelles dans deux cas de figures principaux.

- Le premier cas concerne l'exploitation des primitives architecturales instanciées sur le nuage de points selon la démarche que nous avons détaillée dans la section (5.3.4). Dans ce cas, les relations établies entre les deux niveaux de description (géométrique et sémantique) de la primitive sont exploitées pour extraire un abaque d'informations dimensionnelles.
- Le deuxième cas concerne les profils extraits du nuage de points ou les surfaces reconstruites. Deux procédures permettent d'extraire à la fois les dimensions de l'enveloppe englobant l'entité sur les trois axes, ou d'organiser des quotes progressives tout au long d'un profil (figure 77). La première procédure est complètement automatique tandis que la seconde requiert la sélection de points significatifs à l'intérieur d'un profil.

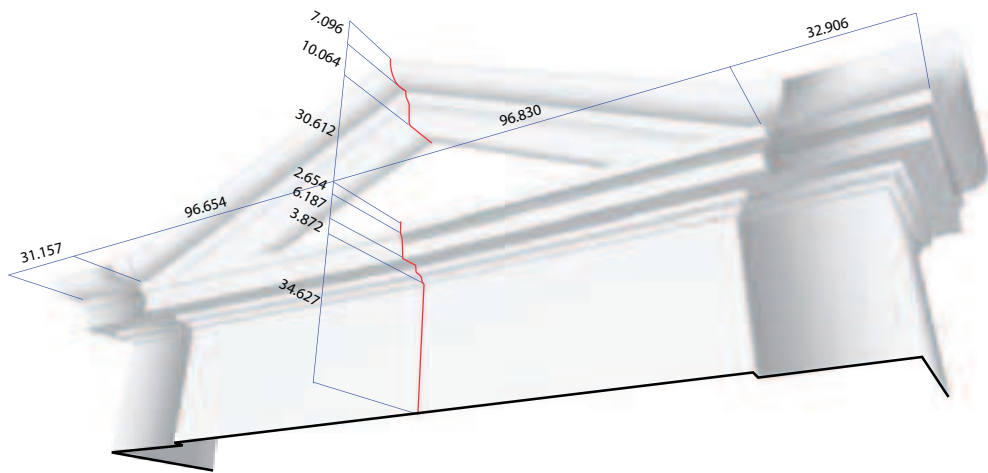


Figure 77. Abaque d'informations dimensionnelles relatives à un élément architectural.

Par rapport à la relation entre profils et dimensions, une perspective intéressante concerne la définition d'un cadre pour l'analyse dimensionnelle d'éléments répétés dans la composition d'un édifice.

6.3.3 Représentations basées sur les polygones

Ces représentations peuvent exprimer le volume de l'élément et l'enrichir à l'aide d'informations reproduisant l'apparence visuelle de ses surfaces. Il s'agit d'une information importante pour la restitution photoréaliste des édifices ou pour l'évaluation de l'état de conservation des matériaux de construction. Les textures peuvent en effet être utilisées comme support pour l'interprétation de l'état des surfaces. Pour les représentations basées sur les polygones on s'appuie sur deux types de rendu : ombré et texturé.

Rendu ombré. Cette technique est basée sur la théorie optique (loi du cosinus de Lambert) qui déclare que la luminosité de chaque petit secteur (polygone) d'une surface ondulante parfaitement diffusée est le cosinus de l'angle de la lumière parallèle incidente. Parmi les différents algorithmes d'ombrage existants, les plus efficaces en termes de rendu simulent des nuances d'ombrage plates ou lissées. La différence principale entre les deux modalités concerne la manière dont les normales des surfaces sont employées [Michel, 2002] :

- *La nuance plate* assigne simplement à chaque triangle un vecteur normal et l'éclairage est calculé individuellement sur chaque face. La nuance plate (ou constante) est valide pour les objets qui ne présentent pas une complexité polyédrique importante : pour les niveaux de détail plus élevés, un grand nombre de polygones ombragés est nécessaire, pour atteindre un niveau de réalisme convenable.
- *La nuance lissée* (ou interpolée) peut être appliquée avec beaucoup d'algorithmes, mais les deux approches classiques sont Gouraud et Phong. Le *Gouraud Shading* indique un niveau de gris pour chaque sommet du polygone et des niveaux intermédiaires sont produits le long de chaque arête par interpolation entre les sommets. Le *Phong Shading* calcule une interpolation des normales pour chaque pixel de l'image en donnant au résultat encore plus de réalisme. Le temps de calcul nécessaire à ce dernier type de rendu reste, par contre, inadéquat pour l'affichage 3D en temps réel.

Rendu texturé. Il est employé pour la visualisation photoréaliste des modèles 3D. Le plaquage, dans sa forme la plus simple implique une texture simple (image, orthophoto) plaquée sur la surface composée d'un ou plusieurs polygones. En plaquant une image sur un objet, la couleur de l'objet à chaque pixel est modifiée par la couleur correspondante, dérivée de la texture.

6.3.3.1 Polygonisation des surfaces

Pour la polygonisation d'une surface NURBS, nous avons customisé la fonction MEL *nurbsToPoly*. Cette commande calcule une tessellation de la surface paramétrique pour produire un modèle polygonal. Nous configurons la commande en utilisant une méthode de tessellation *Standard fit*. Il s'agit d'une méthode qui construit la surface polygonale en fonction d'une valeur de tolérance déterminant le degré d'exactitude maintenu par rapport à la surface originale. Cette valeur de tolérance indique la distance maximale entre la surface originale et la surface polygonale résultante. La procédure mise au point permet de produire trois niveaux de résolution (haut, moyen, bas) en calculant la valeur de tolérance en fonction des dimensions de la surface entière: à partir des dimensions de l'enveloppe englobant l'élément, la distance maximale entre la surface originale et la tessellation est calculée à partir d'un rapport (1:100 haute; 1:50 moyenne; 1:10 basse). Des valeurs arbitraires sont par contre admises pour contrôler finement les résultats de la tessellation. À cette première phase de conversion s'ajoute une phase de raffinement de la surface s'appuyant sur des outils standard de suppression, ou ajout de facettes. Cela sert à corriger les imperfections produites par la phase de conversion des surfaces en polygones.

Dans le cas de surfaces fermées, le nœud résultant de la procédure ci-dessus décrite peut associer à la représentation géométrique le calcul du volume de l'objet. Le calcul du volume utilise la commande MEL *computePolysetVolume* basée sur le théorème de divergence².

6.3.3.2 Plaquage des textures à partir de photographies

Pour le plaquage de textures à partir de photographies orientées nous utilisons le réseau de nœuds mis au point pour la rectification d'image (section 4.3.2). La procédure utilise comme entrées une surface polyédrique ou une sélection de facettes et une image calibrée. Dans ce cas, c'est la résolution de la texture qui peut être définie en fonction de trois niveaux de résolutions différents.

La procédure est basée sur 4 étapes :

- Création d'un nœud matériau,
- Récupération des paramètres de projection à partir de la caméra associée à la photo,
- Projection de l'image sur la surface polygonale à partir du réseau de nœuds (section 4.3.2),
- Extraction d'un fichier image (texture) à partir des résultats de la projection sur la surface (figure 78).

2. Théorème de divergence: $\int_{\text{vol}} \text{Div}(f) dV = \int_{\text{surf}} \text{Dot}(f, n) dS$. Pour calculer des volumes, en posant $f=(0,0,z)$, on obtient le volume = $\int_{\text{vol}} 1 dV = \int_{\text{surf}} n_z(u,v) du dv$. Où n_z est la composante «z» de la normale de la surface au paramètre (u,v). S'il s'agit simplement de triangles la formule est : $\sum_{\text{sur tous les triangles}} (z_0+z_1+z_2)/3 * n_z * A$.



Figure 78. Extraction et plaquage des textures à partir de photographies orientées. Orangerie, Hôtel de Sully, Paris.

Du point de vue des informations associées à la représentation, comme dans le cas de la coloration du nuage de points, le nœud créé garde la relation avec l'image (chemin) utilisée pour le plaquage de la texture.

6.3.4 Synthèse des représentations

La figure 79 présente pour chaque type de représentation traitée, les informations stockées dans les *nœuds* associés, et phases de traitement requises pour leur élaboration.








Représentations	Informations stockées	Procédures
 <p>nuage simple</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Dimensions sommaires (enveloppe englobant) * Nombre de points 	<ul style="list-style-type: none"> * Balayage laser 3D
 <p>carte de profondeur</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Dimensions sommaires (enveloppe englobant) * Profondeur du relief 	<ul style="list-style-type: none"> * Balayage laser 3D * Génération de la carte de profondeur
 <p>nuage coloré</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Dimensions sommaires (enveloppe englobant) * Chemin vers le fichier image 	<ul style="list-style-type: none"> * Balayage laser 3D * Photographie * Orientation d'une photo sur le nuage de points
 <p>profils</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Dimensions sommaires (enveloppe englobant) * Profils caractéristiques 	<ul style="list-style-type: none"> * Balayage laser 3D * Extraction des profils
 <p>dimensions</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Dimensions détaillées (paramètres dimensionnels) * Profils et mesures caractéristiques 	<ul style="list-style-type: none"> * Balayage laser 3D * Instanciation d'une primitive dans le nuage de points
 <p>polygones</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Dimensions détaillées (volume) * Forme de l'élément 	<ul style="list-style-type: none"> * Balayage laser 3D * Reconstruction à partir des profils ou par maillage automatique
 <p>polygones texturés</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Dimensions détaillées (volume) * Forme de l'élément apparence visuelle 	<ul style="list-style-type: none"> * Balayage laser 3D * Orientation de photo * Reconstruction 3D * Extraction et plaquage des textures

Figure 79. Tableau comparatif des représentations géométriques étudiées.

L'analyse des procédures nécessaires à la génération des différentes représentations géométriques (figure 79) impose une observation sur la gestion du projet de documentation d'un édifice. Des représentations géométriques (et les informations associées) peuvent être produites et exploitées directement pendant la phase de traitement des données acquises (figure 80).

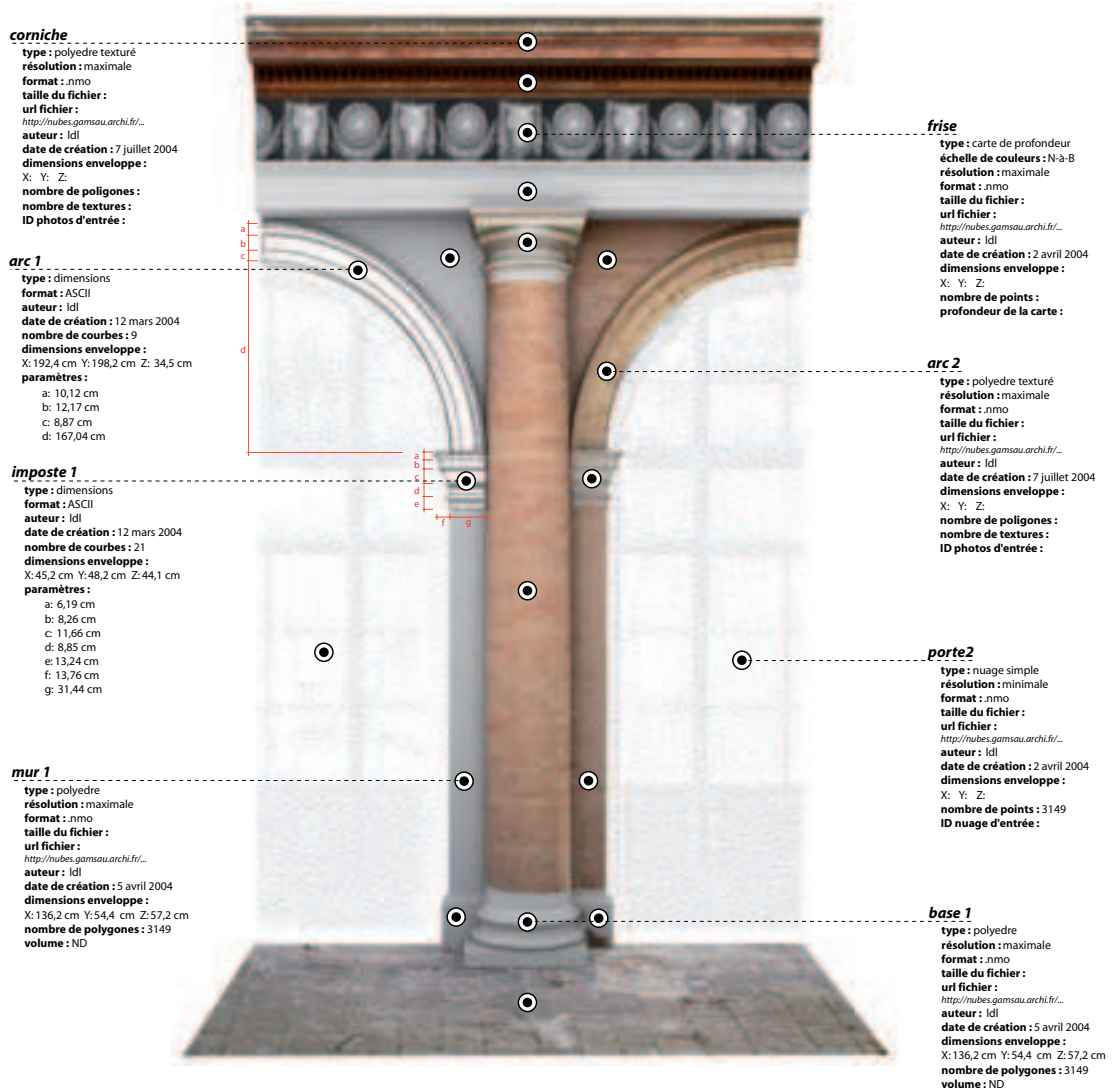


Figure 80. Synthèse de types de représentations géométriques traitées.

Or, notre approche de restitution situe la phase de description de l'édifice à la fin de l'étape de reconstruction de la morphologie. Une démarche différente pourrait consister à conduire la phase de description sémantique de l'objet architectural avant même de commencer la reconstruction de sa morphologie. Ce type de démarche permettrait de produire des représentations dès les premières phases de traitement. Pour donner un exemple, en conduisant une description sémantique directement sur le nuage de points, la segmentation basées sur la décomposition morphologique, permet déjà d'élaborer toutes les représentations basées sur les points (nuage simple, coloré ou carte de profondeur).

6.4 Stockage et exploitation des représentations pour l'affichage 3D temps réel

6.4.1 Optimisation des maquettes pour l'affichage 3D en temps réel

Les nouveaux outils de relevé, ainsi que les traitements géométriques que nous avons décrit, produisent de grandes quantités de données difficiles à afficher en temps réel. Durant la dernière décennie, de nombreuses recherches se sont concentrées sur la visualisation interactive de scènes complexes. Ces recherches focalisent sur la transmission de modèles géométriques lourds, l'amélioration des exécutions de rendu ainsi que la réduction du coût de stockage et de mémoire sans perte d'information importante. Compte tenu des caractéristiques des cartes graphiques, pour être affichée en temps réel, toute surface doit être décomposée en mailles triangulaires. Habituellement, deux types d'information sont codés dans les mailles créées : l'information géométrique (position des sommets dans l'espace et normales extérieures) et l'information topologique (connectivités des mailles et relations entre les faces). Basés sur ces deux types d'information et sur les besoins énumérés précédemment, beaucoup d'algorithmes de compression ont été développés. Ces méthodes sont basées sur :

- *La compression des données géométriques* [Deering, 1995] : elles tentent d'améliorer le stockage d'information numérique des mailles (les positions des sommets, des normales, des couleurs, etc.), ou elles recherchent un codage efficace de la topologie de maille ;
- *Optimisation, filtrage et décimation de maille* [Hoppe, 1997 ; Veron et al., 1998] : ces méthodes simplifient les mailles en supprimant des sommets, des arêtes et des triangles. Elles peuvent itérativement enlever les sommets qui ne répondent pas à certains critères ;
- *La fonction de Niveau-de-Détail (LoD)* [Duchaineau et al., 1997] : elle est utilisée en particulier pour améliorer les performances de visualisation. Le niveau de détail de la maille est calculé en fonction du point d'observation de sorte que des détails qui ne sont pas visibles (faces inclus renversée) ne soient pas affichés.

6.4.2 Conservation et exploitation des représentations géométriques

Pour ce qui concerne le stockage des représentations géométriques élaborées nous sauvegardons tous les données produites en phase de traitement en format ASCII. Ce choix est lié principalement à la volonté de conserver les élaborations produites en format libre. Une deuxième préoccupation concerne l'exploitation des représentations produites dans un système de consultation 3D sur Internet (chapitre 7). Pour cela, des méthodes de conversion des données sont à prévoir pour transformer les données ASCII en formats gérés par les moteurs d'affichage temps réel. Pour implémenter notre approche, après avoir testé différentes solutions pluciques et commerciales, nous avons choisi le format *.nmo* développé par la société Virtools³.

Ce format présente différents avantages :

- Permet le stockage et la manipulation de nuages de points ainsi que le contrôle des

3. **Virtools**. <http://www.virttools.com>

attributs de couleur ;

- Supporte le rendu de courbes B-splines ;
- Utilise une compression des données (points, mailles polygonales, textures) et une fonction de niveau de détail (LoD) ;
- Peut être lu par un plug-in gratuit (Virtools Web Player) disponible pour les principaux navigateurs pour Windows et Mac Os X ;
- Les entités géométriques qu'il contient peuvent être manipulées par l'interactivité programmée en Virtools DEV (dont on parlera dans le chapitre suivant).

Un plug-in (produit par Virtools) permet d'exporter les représentations basées sur les polygones à partir d'une scène Maya en format `.nmo`. Par contre aucune solution n'existe aujourd'hui pour convertir un nuage de points ou des représentations filaires sans passer par l'environnement de développement Virtools. Pour résoudre ce problème nous avons développé des méthodes de conversion spécifiques. Ce choix de séparer la conservation (ASCII) de l'exploitation (`.nmo`) présente l'avantage d'être généralisable et applicable à la conversion vers d'autres moteurs d'affichage.

Représentations basées sur les points. Pour les nuages de points nous adoptons une convention pour la structure du fichier ASCII basée sur l'organisation des données en 6 colonnes : les trois premières colonnes pour les coordonnées dans l'espace, les trois dernières pour l'attribut couleur. La même structure est utilisée pour toutes les représentations basées sur les points (nuages simples, colorés ou avec valeur d'intensité et cartes de profondeur). En ce qui concerne l'exploitation de ces représentations en temps réel un travail de stage conduit au sein du laboratoire [Deliens, 2005] a été mené sur le développement d'un outil de conversion de nuages de points en format `.nmo`. Cet outil permet d'importer le fichier ASCII, de manipuler le nuage dans l'espace, de l'échantillonner en fonction d'un critère spatial et de modifier les attributs concernant l'affichage (la taille des points et les couleurs).

Représentations basées sur les courbes. Pour les courbes, nous utilisons une structure à blocs de trois colonnes. Les représentations de cette catégorie (profils et dimensions) sont composées par des courbes B-splines et des mesures. Pour chaque élément de la représentation nous créons un bloc contenant sur la première ligne le type (courbe ou mesure) l'identifiant de l'élément (numéro progressif pour les courbes ou le label pour les mesures) et une information supplémentaire (le degré de la courbe ou l'axe de la mesure). Les lignes successives du bloc contiennent les coordonnées des points de contrôle pour les courbes. Pour la conversion en format `.nmo` un script VSL (langage interprété de Virtools DEV) a été développé pour la reconstruction des profils et des mesures à partir du fichier ASCII ci-dessus décrit.

Représentations basées sur les polyèdres. Pour le stockage des représentations basées sur les polyèdres en format ASCII, nous utilisons le standard VRML. Ce format peut être lu par une scène Virtools sans besoin de conversions particulières. Néanmoins, le VRML ne gère pas l'atténuation d'arrêts sur les polygones (*soft edges*) nécessaire au rendu ombré basé sur les nuances lissées. Ce paramètre, qui permet un affichage amélioré des surfaces gauches, est par contre pris en compte par le plug-in d'export en format `.nmo` pour Maya.

Le tableau suivant illustre pour chaque catégorie de représentation, une comparaison des poids des fichiers ASCII et `.nmo`.

Représentation	Taille du fichier ASCII	Taille du fichier .nmo
Nuage simple	654 Kb (ASC)	212 Kb
Carte de profondeur	750 Kb (ASC)	332 Kb
Nuage coloré	750 Kb (ASC)	332 Kb
Profils	50 Kb (ASC)	11 Kb
Dimensions	75 Kb (ASC)	19 Kb
Polygones	803 Kb (VRML)	301 Kb
Polygones texturés	1532 Kb (VRML)	656 Kb

Ce tableau montre l'avantage d'une division en deux formats pour le stockage des éléments restitués : le format propriétaire du moteur Virtools semble bien indiqué pour les téléchargements des représentations géométriques depuis une base de données sur Internet. Parallèlement les fichiers en format ASCII restent toujours disponibles au téléchargement pour des exploitations dans d'autres moteurs d'affichages ou pour des traitements ultérieurs.

6.4.3 Enregistrement des représentations dans une base de données

Notre outil pour la restitution d'édifices (annexe A), dont nous avons présenté les principales fonctionnalités dans les trois chapitres précédents, organise les données du relevé (nuages et photographies orientées) et les différentes représentations élaborées dans une structure de dossiers (figure 81). Pour chaque entité manipulée nous enregistrons un fichier (Maya ASCII File) indépendant dans la structure de dossier avec une logique similaire à [Gaiani, 2000]. Cette solution résout avant tout, les problèmes de volume de données que la manipulation de la maquette d'un édifice peut poser. Une fois terminée la phase de découpage morphologique, l'élaboration des représentations multiples peut être ainsi conduite par parties. Comme nous l'avons vu, les nœuds créés par les procédures décrites associent à la géométrie des attributs additionnels concernant des informations spécifiques à un type de représentation (nombre de points, dimensions, volume, profondeur, etc.). De la même façon, des attributs particuliers ajoutent des informations supplémentaires aux nœuds contenant les données de relevé. Par exemple, pour chaque photographie orientée, nous associons au nœud image les paramètres extrinsèques calculés. Dans le but de pouvoir exploiter toutes ces informations dans un outil pour la consultation des relevés et des représentations sur Internet (dont nous parlerons dans le chapitre suivant), l'ensemble des nœuds (représentations géométriques et informations associées) organisés dans la structure locale des dossiers, est enregistré dans une base de données relationnelle distante. Nous travaillons actuellement au développement d'une procédure pour l'insertion et la mise à jour automatique (synchronisation) de ces données dans la base. D'ailleurs, nous évaluons actuellement l'utilisation de XML comme format d'enregistrement de tout type de représentation géométrique.

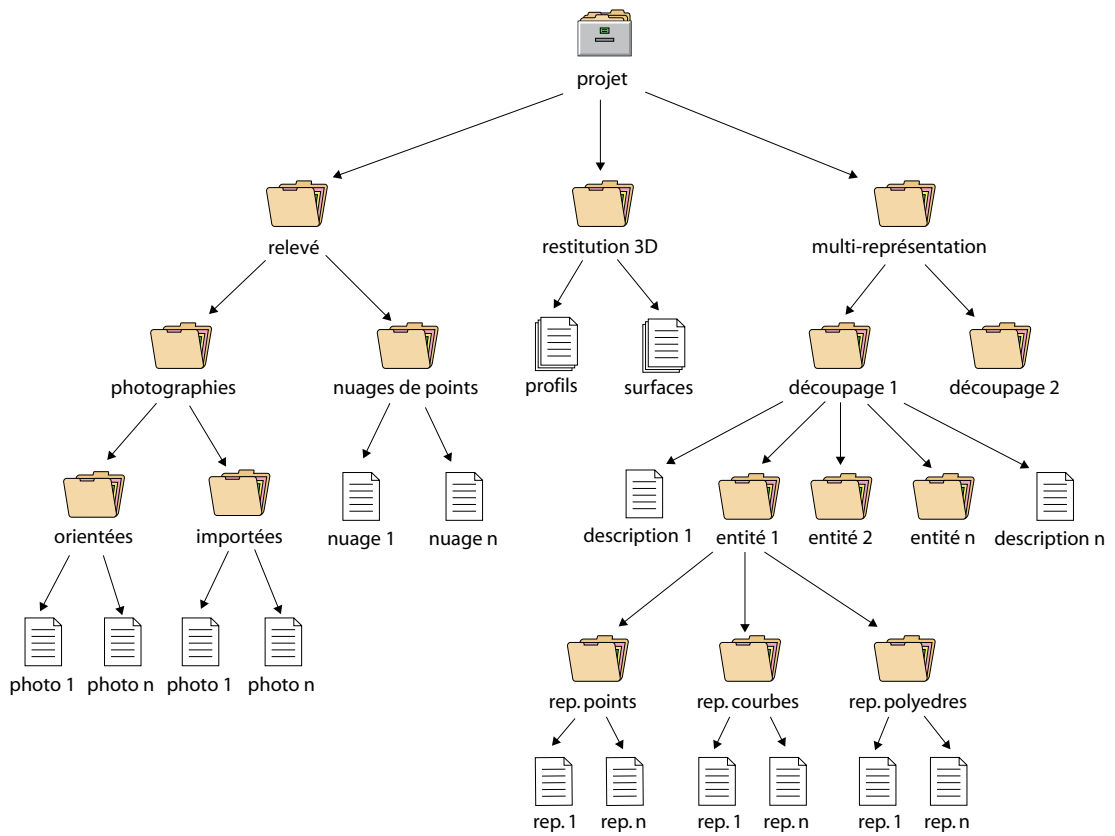


Figure 81. Structure de dossiers créés par l'application pour gérer des projets de restitution

Partie III

7. Structuration d'informations autour de la maquette 3D

L'accès à toute l'information sur une ressource culturelle est une clef pour sa conservation et sa diffusion. L'approche de restitution que nous avons présentée dans les chapitres précédents permet de collecter et d'organiser les informations du relevé ainsi que de produire des représentations multiples. Or, au-delà des données tridimensionnelles, une grande quantité de données hétérogènes recueillies au cours de l'analyse d'un bâtiment et provenant souvent de diverses disciplines s'appuient sur différents media. Différentes études sont menées pour une grande variété de buts comprenant l'analyse des sources documentaires, l'entretien et la surveillance du bâtiment, le développement d'hypothèses de restitution et la diffusion culturelle. Ces activités sont typiquement effectuées à des moments différents, par des professionnels différents et avec différents niveaux d'accessibilité.

La collecte d'informations sur le terrain est en effet juste le commencement d'un long processus qui caractérise la rédaction des documents montrant l'état actuel d'un bâtiment ou l'analyse des transformations qu'il a subi dans le temps. À côté du relevé, le développement de descriptions qualitatives d'édifices est en effet un domaine de recherche beaucoup plus vaste. Il apparaît donc essentiel aujourd'hui d'étudier les conditions au travers desquelles les informations quantitatives, extraites du relevé, et les informations qualitatives, produites par l'interprétation des données acquises ou par l'analyse de sources documentaires, peuvent être analysées à l'intérieur d'une plateforme unique et intégrée. Mais, si l'analyse scientifique de ressources documentaires a pu bénéficier dans les dernières années de solutions informatiques pour l'organisation et la gestion des données (SGBD), très peu de travaux semblent se préoccuper de l'intégration de ces informations dans un dispositif de visualisation qui fasse référence à la morphologie de l'édifice. Il s'agit en effet d'une problématique complexe qui nécessite l'interaction de trois aspects distincts :

- *Le modèle de données*, qui définit la manière dont les informations hétérogènes sont organisées, stockées et indexées dans une base de données ;
- *La représentation géométrique* qui concerne la relation entre un type de représentation (nuages de points, structures filaires, mailles polyédriques ou géométrie enrichie) et le type d'informations qu'elle véhicule (dimensions, structure, volume, apparence visuelle, etc.). On s'intéresse de plus à la manière dont ces représentations sont accessibles à la consultation et/ou à la manipulation ;
- *Un modèle de description de l'édifice* qui constitue le noyau central de l'intégration entre informations quantitatives et qualitatives. Cet aspect concerne la stratégie utilisée pour structurer des informations autour de la morphologie de l'objet et les modalités d'accès aux données.

7.1 État de l'art des systèmes d'informations à l'échelle architecturale

De manière générale, un objet représenté par une géométrie 2D, 2,5D ou 3D est appelé objet spatial. Les premières occasions de gérer des données spatiales sont nées du besoin de traiter de l'information géographique. La notion de SIG (Système d'information Géographique) est alors apparue. Les SIG actuels s'appuient sur une base de données objet-relationnel ou purement objet. La manipulation des données géographiques s'effectue à l'aide d'un langage de requêtes, par exemple une extension de SQL avec des fonctions spécifiques [Gardarin, 1999]. Comme nous le verrons dans ce chapitre, la plupart des concepts développés dans les SIG sont extensibles au problème plus général de l'organisation de données tridimensionnelles. Cette section synthétise les recherches actuellement menées autour de l'intégration entre représentations géométriques d'une morphologie (2D ou 3D) et informations hétérogènes. Ensuite, on présentera les principes (et les fonctionnalités principales) d'un système pour la consultation sur Internet du relevé et des représentations multiples d'un édifice. Le critère qui regroupe les expériences qui suivent concerne la façon dont les informations hétérogènes se relient à la morphologie de l'objet ou à sa représentation.

7.1.1 Systèmes qui relient les informations associées autour d'un édifice entier

Le système APIS (Architectural Photogrammetry Information System) [Herbig, et al., 1997] a été conçu pour l'organisation pratique d'informations utiles pour la préservation du patrimoine culturel. L'objectif principal de APIS est de créer un pont entre le grand public et les professionnels qui utilisent la documentation photogrammétrique pour produire des matériaux pour la restauration ou la rénovation d'édifices. Deux préoccupations distinctes caractérisent ce système :

- L'administration des données : savoir quels bâtiments sont documentés et d'où les photographies ont été prises ;
- L'accès à une documentation efficace sur les procédés de documentation photogrammétrique d'édifices en utilisant les règles essentielles développées par [Waldhäusl et al., 1994].

Chaque fiche reliée à un édifice contient les informations concernant :

- La localisation de l'objet et sa description historique ;
- La localisation des archives de conservation des photographies originelles et la description de leur contenu et des données techniques concernant la prise de vue ;
- La description de dessins techniques produits à partir du relevé.

Une recherche par mots clefs peut être effectuée en plusieurs langues. Au-delà des données stockées dans les champs de la fiche descriptive, la base des données conserve aussi des références bibliographiques reliées au bâtiment.

[Kadobayashi et al., 2004] développent un système d'information capable de visualiser des modèles 3D d'édifices et de gérer une banque d'images. Le système contient actuellement plus de 350 photographies parmi 1600 fiches contenant documents, photographies, dessins et modèles 3D concernant deux églises byzantines de l'île de Saint Nicolas en Turquie. L'utilisateur peut effectuer des recherches dans la base des photographies en spécifiant des mots clefs ou en cliquant sur des repères (représentant les prises de vue) dans un plan. Le système

permet l'insertion d'une photographie dans la base, d'éditer les mots clefs ou d'imprimer les résultats d'une recherche sous forme d'un catalogue d'images. De plus, une interface permet d'indiquer la position et l'orientation de l'appareil photo au moment de la prise de vue sur un plan de l'édifice. Le système permet aussi de naviguer dans des modèles 3D des deux églises obtenus par scanner laser 3D et maillage automatique.

7.1.2 Systèmes qui relient les informations aux entités d'une représentation 2D

[Klotz, 2003] développe un système d'informations spatiales sur les fouilles archéologiques de la cité romaine de Ephesos en Turquie. Une orthophoto numérique à l'échelle 1 :15000 sert de système de référence spatial. La photo contient différents repères reliés à plusieurs types d'information dans le système. Les données vectorielles bidimensionnelles sont générées par numérisation et/ou mise en cohérence de plans disponibles. Différents plans qui font référence à des systèmes de coordonnées locales et à différentes échelles sont assemblés dans un système de coordonnées globales.

Avec une approche similaire [Kraus, 2003] s'intéresse à l'organisation et à la gestion des données concernant l'activité de restauration du château de Schönbrunn à Vienne. La documentation de relevé, créée par restitution photogrammétrique est élaborée en prenant en considération à la fois les aspects métriques et topologiques. Un système de gestion de l'édifice (Building management System) conserve toutes les données et les informations issues du relevé. Un modèle relationnel assure les liaisons entre les documents graphiques et des fiches contenant les activités de restauration.

Le projet ARKIS (Architecture Recovery Knowledge Information System) [Salonia et al. 2000] a pour objectif de produire la documentation des processus de dégradation par la représentation intégrée de la morphologie du bâtiment, des matériaux qui le compose et de leurs caractéristiques physiques ainsi que de l'analyse historique-architecturale des facteurs environnementaux. Dans le cadre de ce projet, une interface pour la gestion d'informations patrimoniales a été développée en AVENUE, (langage de programmation intégré aux systèmes ESRI). Ce système est conçu pour l'organisation, la représentation et le partage sur le Web des connaissances et des informations concernant l'objet architectural, son contexte immédiat et son contexte territorial. L'aspect innovant du projet ARKIS réside dans l'application des fonctionnalités spécifiques aux SIG à l'échelle de l'édifice s'appuyant sur les formes canoniques de représentation graphique (plans, élévations et coupes). L'approche méthodologique consiste en une extension du modèle géo-relationnel par les procédures de dessin assisté par ordinateur et par une gestion spécifique des données. Cette approche permet de mettre en relation les données alphanumériques en les localisant spatialement à l'intérieur de représentations bidimensionnelles. Pour chaque domaine de connaissance spécifique, l'information est projetée sur la représentation graphique de l'édifice dans un calque. Chaque calque thématique est de fait associé à des tableaux de fiches descriptives qui font références aux entités graphiques qu'ils contiennent.

7.1.3 Systèmes qui relient les informations aux entités d'une représentation 3D

Virterf [Knuyts et al., 2001] est un système d'informations dédié aux professionnels du domaine de la conservation architecturale. Une première partie du logiciel permet de reconstruire un modèle 3D d'édifice de façon semi-automatique à partir d'un ensemble de photographies et d'un relevé topographique, tandis que la deuxième partie offre des outils pour qualifier et interroger la maquette résultante. Des informations hétérogènes peuvent

être organisées en thèmes ou ancrées à la géométrie d'un modèle 3D dans un dispositif de visualisation temps réel. L'information est organisée en fonction de thèmes d'*attributs* ou de thèmes de *liens*. Chaque thème correspond au point de vue spécifique d'un spécialiste. Les thèmes d'attributs peuvent regrouper des informations sur les matériaux, sur la pathologie (type de dégradation) ou sur les phases de construction. Ils ne sont pas imposés mais créés par l'utilisateur en fonction de ses besoins. Chaque thème est divisé en calque en relation aux types d'attributs (par exemple bois ou pierre dans le thème matériaux). L'utilisateur peut qualifier la géométrie de l'objet en créant une relation entre un ensemble de facettes et un calque. Les résultats d'une recherche par *attributs* seront ainsi indiqués sur le modèle 3D par un changement de couleur des facettes répondant au critère sélectionné. Les *liens* permettent d'attacher au modèle 3D des informations hétérogènes (texte, images, requête, ou documents html). Dans la scène 3D ces liens sont matérialisés par des petites sphères colorées en fonction du type d'information. Des fonctions permettent enfin d'extraire des d'informations dimensionnelles directement sur le modèle 3D. Une mesure peut être prise en sélectionnant deux points sur les sommets du modèle tandis que l'aire d'une surface peut être calculée en sélectionnant un ensemble de facettes.

7.1.4 Systèmes qui structurent les informations autour d'un modèle de description de l'édifice

Dans le but d'interfacer un ensemble d'informations autour d'un édifice, [Dudek et al., 2003] proposent d'utiliser la morphologie comme support pour le tri de données et la visualisation de la documentation. Les objets que les auteurs utilisent comme moyen pour visualiser des informations sont identifiés au travers de l'analyse des différences et des similitudes morphologiques, structurelles et fonctionnelles des édifices qui composent une scène urbaine. Une fois cette étape de comparaison terminée, des concepts sont classifiés en utilisant le principe de l'héritage de propriétés. Chaque objet de la scène est formalisé dans une classe qui contient trois blocs d'informations :

- Le *bloc morphologie* contient les informations relatives aux propriétés géométriques de l'objet ;
- Le *bloc documentation* est utilisé pour manipuler ou interroger la base de données qui référence la documentation ;
- Les *bloc typologie et évolution* conservent une évaluation de la documentation qui sera intégrée à l'intérieur de la scène 3D, permettant par exemple de visualiser avec des codes de couleurs différents les édifices pour lesquels la base contient différentes pièces de documentation. Les instances sont conservées dans un contexte SGBDR (MySQL) ainsi que sous forme de fiches XML.

Les blocs d'informations concernant la documentation, la typologie et les évolutions sont utilisés dans le but d'attacher à chaque instance un ensemble d'attributs qualificatifs qui sont utilisés pour contrôler l'apparence actuelle de l'objet. Une fois les concepts identifiés, organisés et formalisés, la construction de la scène 3D résulte de l'instanciation des formes du modèle théorique. Les propriétés des instances du modèle et l'état courant de leur propriétés justifient leur attributs. Une indication concernant l'analyse documentaire (niveau de certitude, type de documentation, etc.) peuvent aussi être visualisée à l'intérieur de la scène VRML. Les scènes 3D peuvent être utilisées comme un moyen d'interrogation, en sélectionnant des édifices par exemple ; mais elles peuvent aussi être considérées comme la visualisation des résultats de

recherches. Ces scènes sont en effet générées automatiquement par instanciation des objets correspondant à la requête.

[Heine, 1999] développe une méthodologie pour la documentation de l'édifice qui pour le développement d'un système d'information 3D à l'échelle architecturale. Cette méthodologie est basée sur la description de l'édifice s'appuyant sur la structuration hiérarchique d'objets élémentaires. Chacun de ces éléments est classifié en différentes catégories (masse, espace, aire) et nommé par un terme architecturale unique. Pour l'auteur, la documentation détaillée d'un édifice requiert une notion de structure capable de décrire l'objet d'étude en fonction d'une analyse architecturale. Un élément de haut niveau est défini par l'enveloppe qui entoure ses éléments de niveaux inférieurs. Par exemple, la combinaison d'un ensemble de *marches* définit un élément d'ordre supérieur comme un *escalier*. En ce qui concerne le modèle conceptuel de données, le niveau le plus bas de la structure regroupe les informations concernant les éléments de base (primitives). En analogie avec le modèle architectural, les niveaux supérieurs successifs résultent de la combinaison des niveaux inférieurs. Chaque enregistrement dans la base de données contient des informations concernant :

- *La géométrie* de l'objet définie par les informations métriques et topologiques ;
- *La classification* de l'objet (description sémantique) définie par le type et l'ordre de l'élément ;
- *L'identification* de l'objet donnée par le nom ou le numéro de l'élément.

7.2 Proposition d'un système pour la consultation du relevé et des représentations multiples de l'édifice

À partir de l'analyse de ces travaux nous isolons une série d'exigences auxquelles un système pour la consultation du relevé et des représentations multiples de l'édifice nous semble devoir répondre.

Un premier problème concerne l'exigence de gérer l'information rassemblée autour de la mesure, l'analyse et l'interprétation de la forme de l'édifice. Les systèmes qui organisent les informations autour d'une seule représentation limitent la consultation de l'état actuel de l'édifice à un seul support d'analyse : des plans, des coupes, des orthophotos dans un plan bidimensionnel ou des triangles d'une maquette 3D. Dans ce sens une exigence importante nous semble refléter la distinction entre une représentation de l'édifice *tel que saisie* et des représentations s'appuyant sur l'interprétation de ces données.

Un deuxième problème concerne la possibilité de rendre les données et les informations collectées accessible à une variété importante d'utilisateurs (chercheurs, administrateurs, grand public, etc.). Dans ce but, le système de consultation doit nécessairement refléter les différents points de vue de disciplines qui s'intéressent à l'étude de l'édifice, à sa conservation et à sa valorisation. La variété des analyses possibles impose la gestion de plusieurs modalités de consultation, chacune s'appuyant sur une stratégie spécifique d'organisation des informations et sur un système de représentation. En effet, les systèmes qui structurent les informations autour d'un modèle de description de l'édifice (section 7.1.4) sont efficaces pour un seul type d'analyse car l'organisation des concepts décrivant la morphologie de l'édifice reflètent les exigences propres à un seul domaine disciplinaire.

Un troisième problème concerne l'accès aux informations. Il est nécessaire d'envisager des solutions techniques pour partager les données relevées ainsi que les analyses produites à partir de leur traitement. Cela requiert d'un côté d'arriver à structurer des informations en fonctions de différents profils utilisateurs, mais aussi de la possibilité de construire une documentation spécifique en fonction d'une analyse particulière. Dans ce sens le système doit être adapté à la collecte et à l'organisation d'informations spécifiques pas forcément structurées à priori.

Cette dernière partie de la thèse concerne la définition d'un outil pour établir des relations bilatérales entre les informations hétérogènes et un modèle de description de la morphologie de l'objet. On prendra en compte les seules données extraites à partir du relevé de l'édifice et non pas les sources documentaires car cela a déjà fait l'objet d'une thèse développée au sein de notre laboratoire [Blaise, 2003] et car ce domaine relève de problèmes d'interprétation qualitative du corpus d'informations.

Ce système de consultation (voir annexe B) permet :

- L'accès et la manipulation des données relevées (nuages de points et photographies) ;
- L'extraction d'informations dimensionnelles (prise de mesure) ;
- La construction d'une structure de représentation personnalisé de l'édifice en fonction d'un point de vue ;
- La structuration d'informations hétérogènes autour du modèle de description de l'édifice.

7.2.1 L'architecture du système

En fonction des problèmes décrits dans la section précédente, nous avons développée une *application Internet* basée sur une architecture en trois parties. Du point de vue technique ce système répond à trois exigences distinctes :

Stockage de données hétérogènes. Une base de données, développée en MySQL, organise les données brutes du relevé, les représentations multiples et les informations associées en fonction de différents profils utilisateur ;

Manipulations de représentations géométriques tridimensionnelles en temps réel. Une scène 3D interactive développée en Virtools DEV permet le téléchargement, l'affichage et la manipulation des représentations 3D ;

Consultation et gestion des données en ligne. L'application est développée autour d'un site Internet qui constitue l'accès utilisateur aux données stockées dans la base et fournit les passerelles nécessaires pour le dialogue entre la scène 3D et la base de données.

7.2.2 Présentation de l'environnement de développement

La scène 3D est intégrée à l'application Web sous forme d'un plug-in qui communique avec l'application en PHP/MySQL par des fonctions *javascript*.

7.2.2.1 PHP/MySQL

PHP est un langage interprété, exécuté à partir d'un serveur. La syntaxe du langage provient

de celle des langages C, du Perl et de Java. Ses principales caractéristiques résident dans la possibilité de d'inclure le script PHP au sein d'une page HTML, et dans l'interfaçage avec MySQL, un SGBD (Système de Gestion de Bases de Données) disponible sur de nombreuses plateformes : Unix, Linux, Windows, MacOS X, Solaris, etc.).

7.2.2.2 Virtools DEV

Le paradigme de développement spécifique de Virtools considère les objets 3D comme des composants individuels, indépendants des données qui leur sont associés. L'architecture résultante permet d'attribuer des comportements modulaires aux objets qui composent la scène. Les applications créées avec ce système sont directement exploitables comme exécutables ou comme plug-in Internet.

Virtools DEV est composé de 5 parties clefs :

Une Interface Graphique. La programmation est supportée par une interface graphique intuitive pour créer des interactions complexes dans l'espace 3D, par agrégation de blocs dans un schéma de relations ;

Un moteur à comportement. Le moteur à comportement permet de manipuler à la fois des blocs d'une bibliothèque et aussi des blocs spécifiquement programmés. La librairie de fonctions concerne les catégories suivantes : caméra, caractères, collisions, contrôleurs, grilles, interface, lumières, opérateurs logiques, matériaux, textures, modification de polyèdres, fonctions narratives, optimisation des performances, particules, etc. ;

Le SDK (Software Development Kit). Il s'agit d'un ensemble d'outils de développement (librairies, DLLS) qui fournissent un accès aux fonctionnalités de bas niveau utilisées par Virtools ;

Un Language de scripting. Le VSL (Virtools Scripting Language) est un langage interprété qui complète l'éditeur de schéma (interface graphique) et le SDK. Ce langage est extrêmement utile pour remplacer les opérations complexes sur les paramètres (calculs mathématiques, opérations sur les chaînes de caractères) et pour créer des scripts de comportements avancés.

Un moteur de rendu. Le moteur de rendu fournit un rendu 3D temps réel. Il supporte les standards OpenGL et DirectX. Il supporte également les *shaders* basés sur les sommets et les pixels (DX9, HLSL).

7.2.3 La scène 3D

Pour la manipulation des représentations géométriques nous avons conçu une série de blocs permettant des interactions spécifiques avec les entités manipulées. Les comportements que nous avons implémenté dans l'application concernent principalement la navigation dans l'espace, c'est-à-dire la façon dont une caméra d'observation réagit aux mouvements de la souris ; les procédures pour le téléchargement des représentations géométriques depuis la base de données ; des outils spécifiques pour la prise de mesure sur le nuage de points et l'extraction de profils.

7.2.4 La base de données

La base de données est divisée en trois parties principales :

- La partie *Relevé* contient les nuages de points, les photographies et organise les informations extraites par les utilisateurs sur les données tridimensionnelles ;
- La partie *Représentation* contient les points de vue construits par les utilisateurs. Chaque point de vue intègre un découpage morphologique, une description sémantique et un système multi-représentations ;
- La partie *Qualification* qui permet de qualifier les entités morphologiques isolées dans la description de l'édifice par la construction de thèmes d'attributs autour de la représentation de l'édifice.

7.2.5 Le dialogue entre les parties du système

L'application Web est basée sur le dialogue entre la base relationnelle SQL et la scène 3D par le biais de script php et java (figure 82).

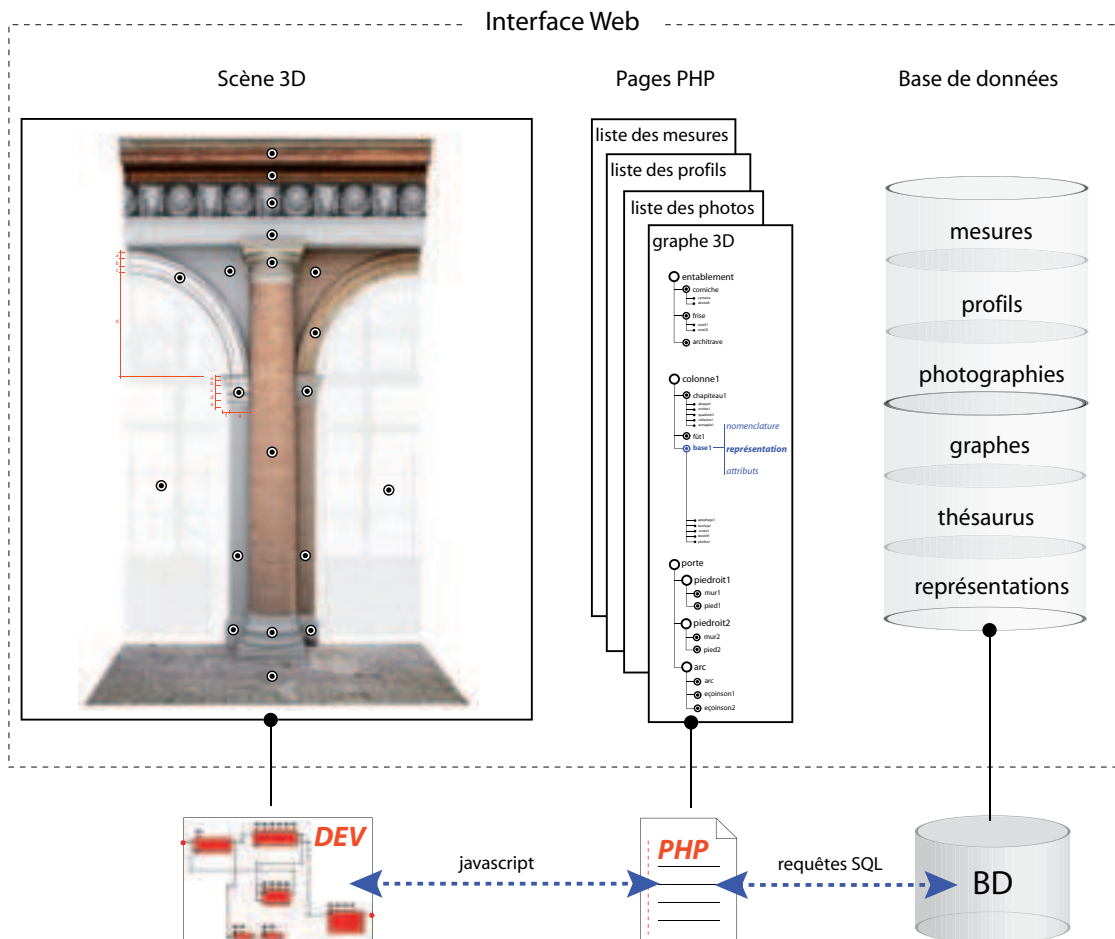


Figure 82. L'architecture du système proposé : à gauche la scène 3D sous forme de plug-in Virtools, au centre le site en format PHP à droite une base de données relationnelle.

En ce qui concerne l'envoi de commande de la partie Web vers la scène 3D nous utilisons des fonctions javascript spécifiquement programmées. Dans le sens inverse un bloc DEV (GetWebData) permet de formuler des requêtes (URL avec des variables) dans la base de données en passant par une page PHP. Pour gérer la synchronisation entre les représentations dans l'espace et les données stockées dans la base, nous dupliquons de façon dynamique les tableaux relatifs aux entités manipulées dans une base de données interne à la scène 3D.

7.3 Outils pour la consultation du relevé

Le système développé propose différents outils pour la consultation des données relevées. Une première catégorie d'outils concerne l'extraction interactive d'informations pertinentes du nuage de points et la recherche de la position de la prise de vue d'une photographie stockée dans la base de données.

La figure 83 illustre le schéma de la base de données relative au bloc relevé.

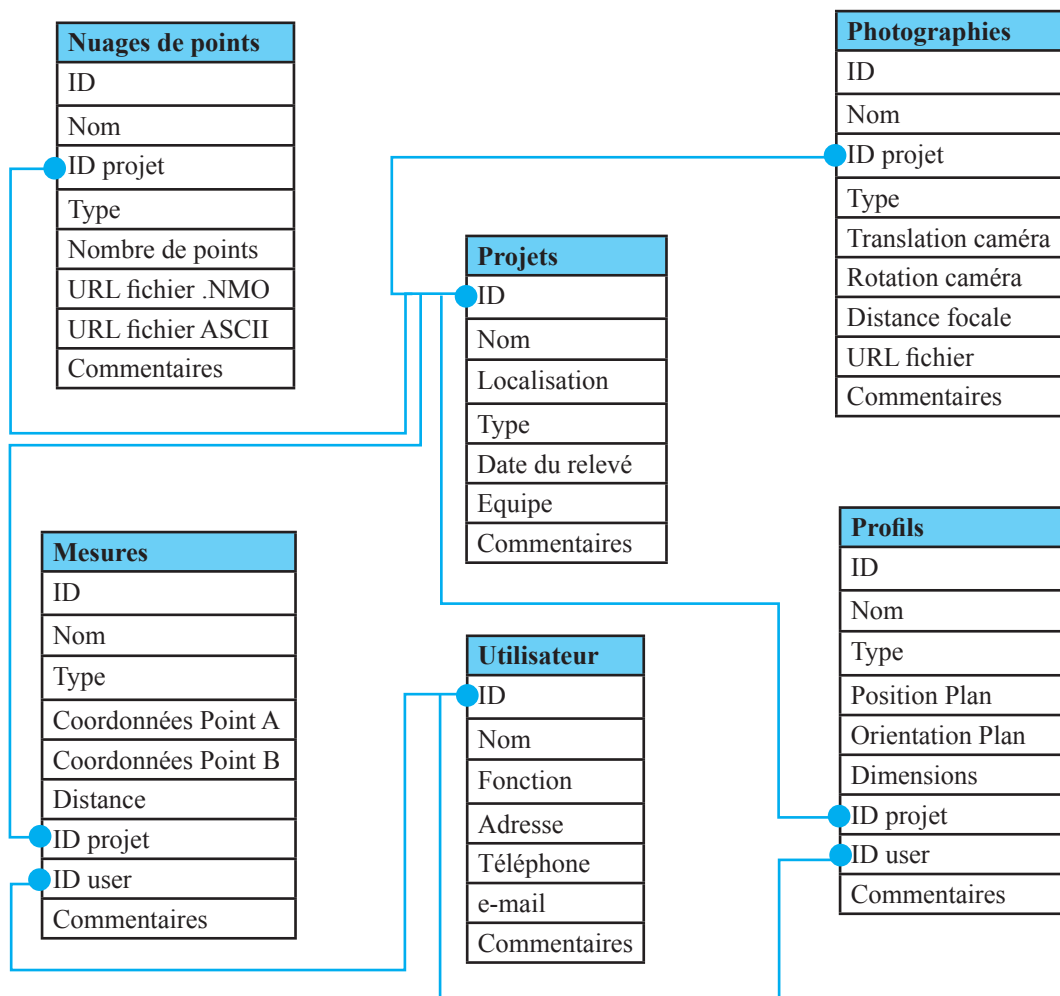


Figure 83. Schéma de la base de données du système de consultation.

7.3.1 La prise de mesure interactive

Pour la prise de mesure interactive nous avons mis au point quatre outils principaux :

Mesure simple. Cet outil permet de sélectionner deux points dans le nuage et d'afficher leur distance dans l'espace.

Mesure à la plomb. Cet outil est particulièrement utile pour la collecte de mesure qui sont très difficiles à prendre sur le terrain. Il permet de calculer une hauteur (sur l'axe vertical du repère globale) en fonction des relations trigonométrique entre deux points sélectionnés.

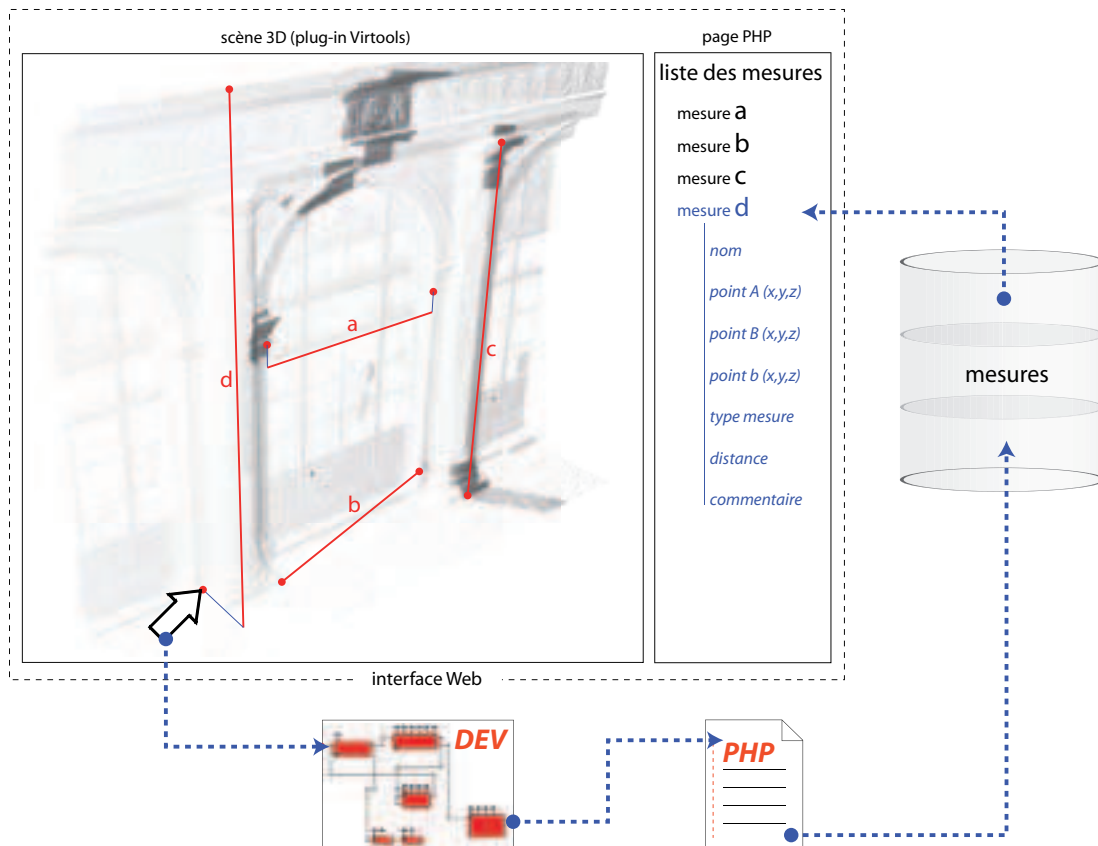


Figure 84. Schéma du fonctionnement de l'outil pour la prise de mesure sur le nuage de points.

Mesure à niveau. Cet outil suit le même principe que le précédent mais il exprime la mesure en rapport à l'axe horizontal qui relie les deux points sélectionnés.

Une fois saisie, chaque mesure est enregistrée dans un tableau interne à la scène 3D et envoyée par l'intermédiaire d'un script java à une page PHP qui gère son insertion dans la base de données (figure 84). Cela permet de qualifier la mesure par d'autres informations complémentaires comme par exemple un label spécifique ou des commentaires.

Mesures progressives. En exploitant les mêmes fonctionnalités nous avons mis au point une fonction permettant d'organiser des barres de mesures progressives. Une fois défini, un axe pour la distribution des mesures (en sélectionnant deux points sur le nuage), la procédure enregistre la position projetée sur la barre des points sélectionnés dans le nuage et calcule les

distances progressives ainsi que la distance totale entre les deux extrémités.

Coordonnées simples. De la même manière une procédure plus simple permet de sélectionner des coordonnées et de les transformer en points de repère dans le nuage de points. Dans ce cas aussi un label et un commentaire peuvent être associés au point.

7.3.2 Extraction de profils

La procédure mise au point pour l'extraction de profils est basée sur le même principe que celle proposée pour la reconstruction tridimensionnelle (section 4.3.1) : l'utilisation d'une caméra orthogonale manipulable dans l'espace avec un champ visuel limité en profondeur. Une fois une orientation et une échelle du plan d'intersection choisies, une procédure enregistre dans la base de données les informations relatives à la position, l'orientation et l'échelle du plan (calculées par rapport à l'enveloppe englobant le nuage), ainsi que l'épaisseur (profondeur du champ visuel) et le niveau de zoom de la caméra associée (figure 85). Dans l'autre sens, la sélection d'un profil dans la page PHP permet de retrouver le profil correspondant dans la scène 3D. Cette procédure consiste à modifier les paramètres d'une caméra orthogonale en fonction des attributs enregistrés dans la base de données et transférés par javascript au travers d'une fonction spécifique.

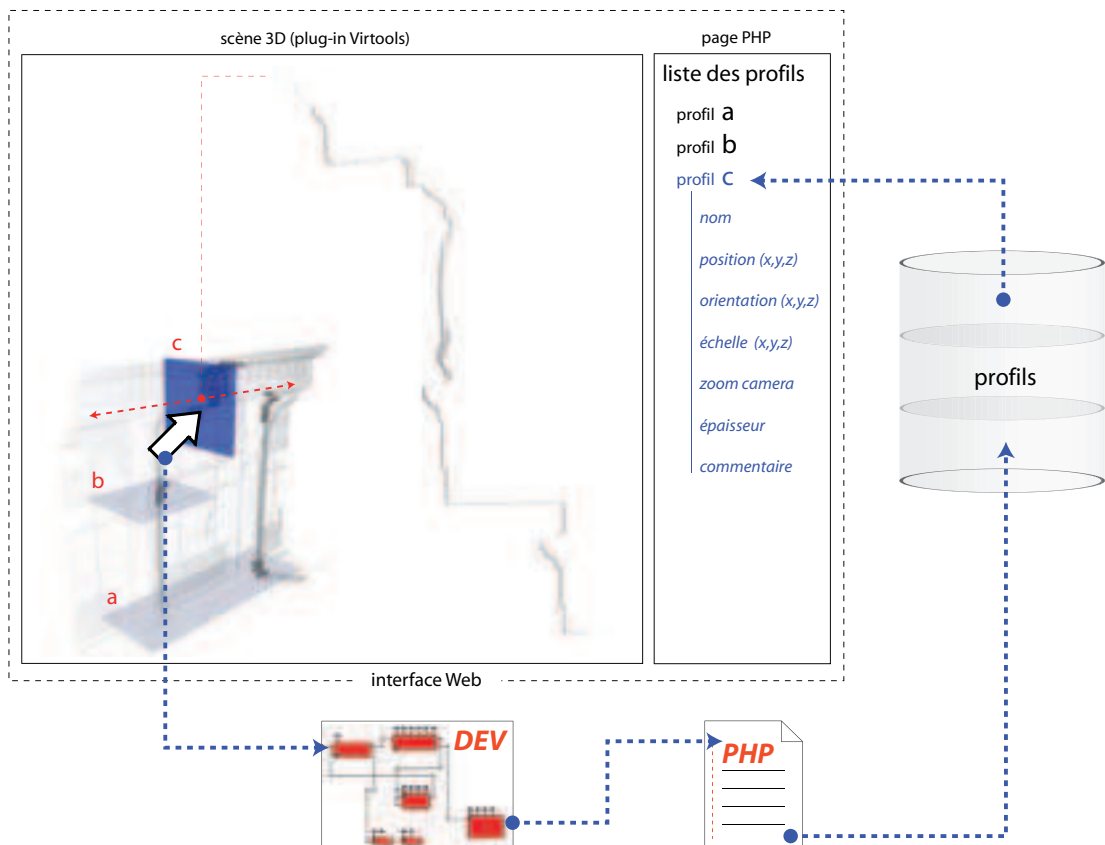


Figure 85. Schéma du fonctionnement de l'outil pour l'extraction des profils du nuage de points

7.3.3 Recherche du point de vue d'une photographie

La procédure de dialogue entre la base de données et la scène 3D que nous venons de décrire est utilisée pour la recherche du point de vue d'une photographie préalablement orientée sur le nuage de points. Dans ce cas, il s'agit de reproduire les paramètres d'orientation externe d'une caméra à projection perspective. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 6, ces paramètres sont associés au nœud photo après le calcul d'orientation. La position, l'orientation ainsi que la distance focale de la caméra associée à l'image sont transmises à une fonction programmée en DEV qui calcule l'interpolation entre la position et l'orientation courantes de la caméra de navigation et les valeurs relatives à la photographie sélectionnée (figure 86).

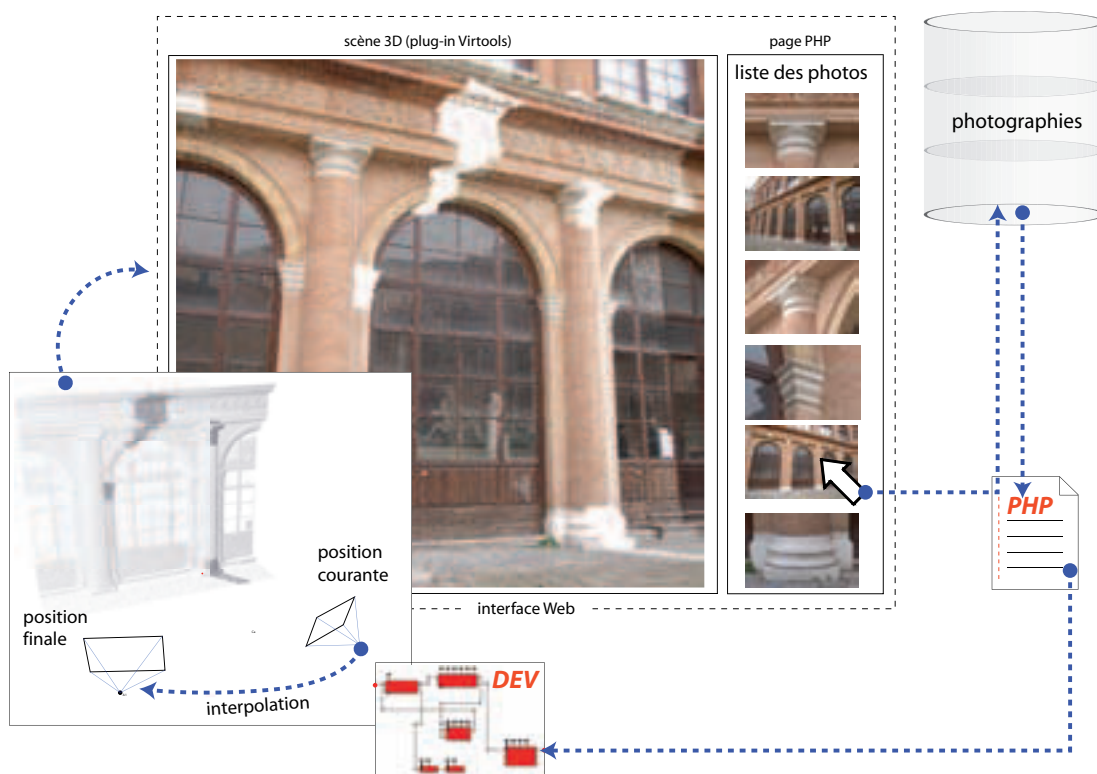


Figure 86. Schéma du fonctionnement de l'outil pour la recherche du point de vue d'une photographie dans la scène 3D.

7.4 Outils pour la construction d'un point de vue

Dans le chapitre 6, nous avons vu que notre approche de restitution permet d'isoler un ensemble de concepts (termes de description) à partir d'une décomposition de la morphologie de l'édifice et de les organiser en structures hiérarchiques. La division entre trois niveaux parallèles de description (sémantique, structurel et de représentation) peut être donc exploitée pour la construction de points de vue sur l'édifice. Cela consiste en la possibilité de construire une représentation de l'édifice en fonction d'un besoin d'analyse spécifique.

La logique du système est basée sur l'exigence de décliner les structures de description pour permettre une vraie liberté d'organisation des données. Par exemple, à partir de la même décomposition morphologique, l'utilisateur peut construire un point de vue sur l'objet par la

définition des relations hiérarchiques entre les entités morphologiques atomiques et le choix d'un système de représentation (figure 87).

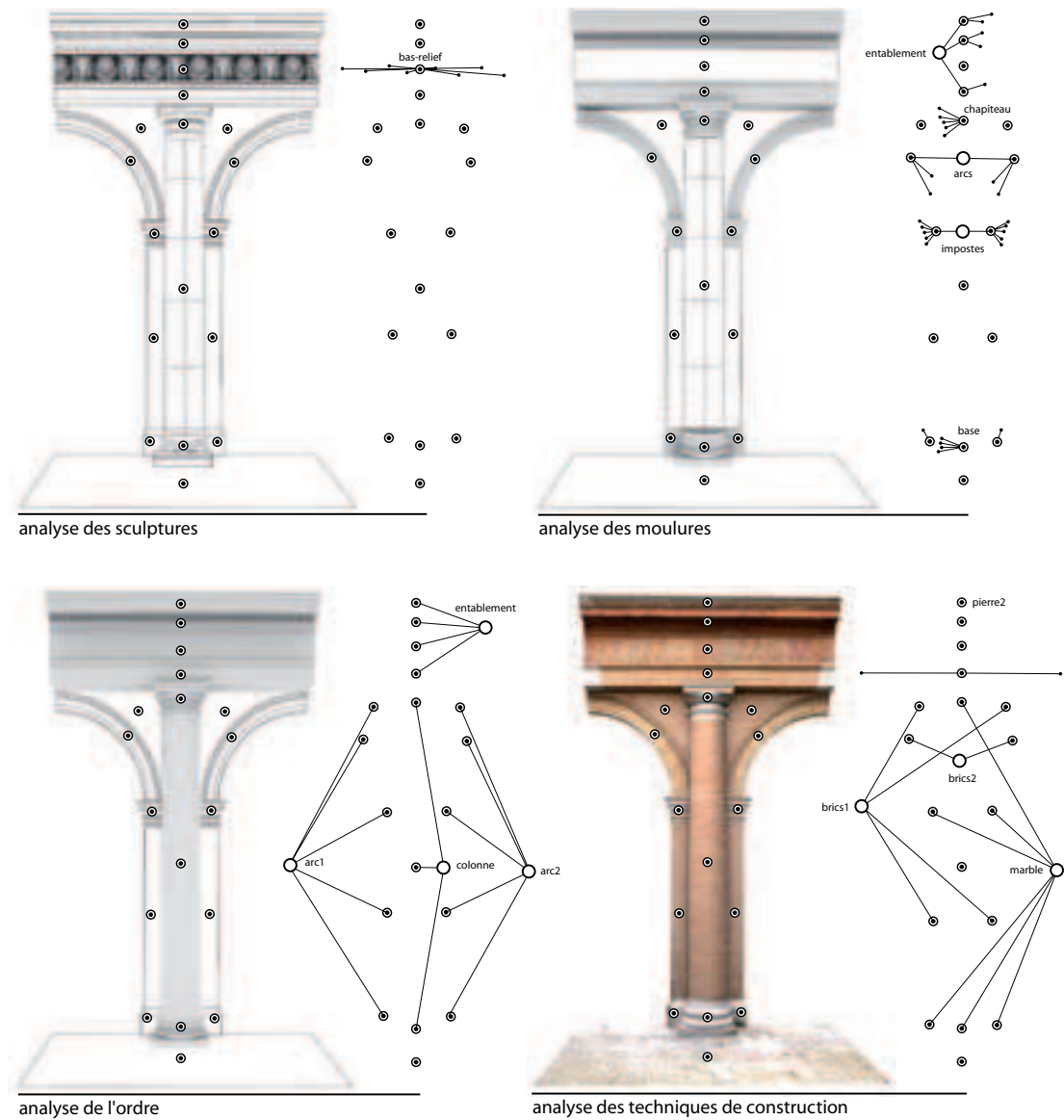


Figure 87. Quatre «points de vue» sur l'objet étudié élaborés à partir de la même décomposition morphologique.

Un point de vue résulte de la relation entre :

- *Une décomposition morphologique.* Il s'agit de la stratégie de décomposition choisie en phase de reconstruction (ensemble d'entités morphologiques) et qui constitue le point de départ pour l'établissement de relations sémantiques ;
- *Une description structurel.* Ce modèle est constitué d'un réseau de relations établies entre les entités morphologiques de la décomposition et d'autres entités d'ordres supérieur (groupes finalisés) ou inférieur (repères) ;

- *Un système de représentations.* Il s'agit d'une collection de représentations associées aux entités de la décomposition morphologique. Chaque représentation associée à une entité morphologique peut être disponible en différentes résolutions. Par exemple, pour analyser les éléments de décor d'un édifice ou faire une classification iconique des personnages des bas-reliefs, nous avons besoin d'une représentation qui permet de saisir tous les détails de la surface. Dans le même sens, on pourrait s'intéresser à l'analyse comparative des éléments moulurés ou des éléments de l'ordre architectural. Dans ce cas là, la représentation d'informations dimensionnelles (mesures progressives des parties d'un profil) est un support indispensable ;
- *Un système de qualification.* Il s'agit de la possibilité de qualifier par différents descripteurs les éléments qui composent l'édifice. Nous distinguons deux types de descripteurs : ceux qui sont attachés à l'entité architecturale et ceux qui sont associés à sa représentation. En ce qui concerne le premier cas, il s'agit de qualifier l'élément sans faire référence à un aspect particulier de sa représentation ou de son extension spatiale. L'information est alors attachée au symbole représentant l'entité. Dans le deuxième cas, l'attribut de qualification est directement connecté à un aspect de la représentation géométrique : par exemple une dégradation spécifique visible sur une texture.

7.4.1 Construction d'un graphe de description à partir d'un découpage morphologique

Cette phase utilise des outils très proches de ceux présentés dans la section (6.2.1.2). En effet, cette phase peut être conduite à la fois dans l'outil de restitution tridimensionnelle et à la fois dans le système de consultation en ligne. Dans le deuxième cas, à partir du choix d'une décomposition morphologique de l'objet (réalisé en phase de reconstruction 3D), des outils permettent de créer des groupes en sélectionnant un ensemble d'entités (le groupe est créé automatiquement au barycentre de l'ensemble d'entités), ou d'ajouter des points de repères aux entités en sélectionnant des coordonnées sur le nuage de points de l'édifice ou sur des parties (faces et sommets d'un polyèdre ou points de contrôle d'une courbe) de ses représentations.

7.4.2 Nomenclature par thesaurus

Pour la nomenclature des entités de la description, nous utilisons des thesaurus contenant des termes et leurs définitions. Ces thesaurus peuvent être utilisés pour qualifier les entités de la description sémantique et leur choix dépend de l'analyse que l'on veut conduire sur l'objet. En ce qui concerne l'analyse du vocabulaire de l'architecte, nous nous appuyons sur le thesaurus de la Médiathèque du patrimoine. Il s'agit d'un thesaurus basé sur le travail de [Perouse de Montclos, 1972] qui organise les termes décrivant les éléments architecturaux par rapport à deux critères : le premier est l'identification des termes concernant les parties qui composent un édifice ; le deuxième est l'identification d'un vocabulaire propre à des types d'édifices.

D'autres thesaurus spécifiques à d'autres points de vue pourront être pris en considération pour qualifier les éléments en fonction d'autres types d'analyse, comme par exemple le vocabulaire des matériaux de construction ou des pathologies de dégradation. Un raisonnement pourrait entre autre être mené sur le développement d'une base d'icônes (personnages historiques, religieux, etc.) pour l'analyse des décors sculptés.

Une fois sélectionné une entité dans le graphe de description (scène 3D), l'identifiant de

l'entité est envoyé à page PHP et utilisé comme filtre pour la requête dans la base de données. Cela permet d'afficher la fiche relative à l'élément. L'utilisateur peut alors qualifier l'entité sélectionnée par un terme du thésaurus (figure 88).

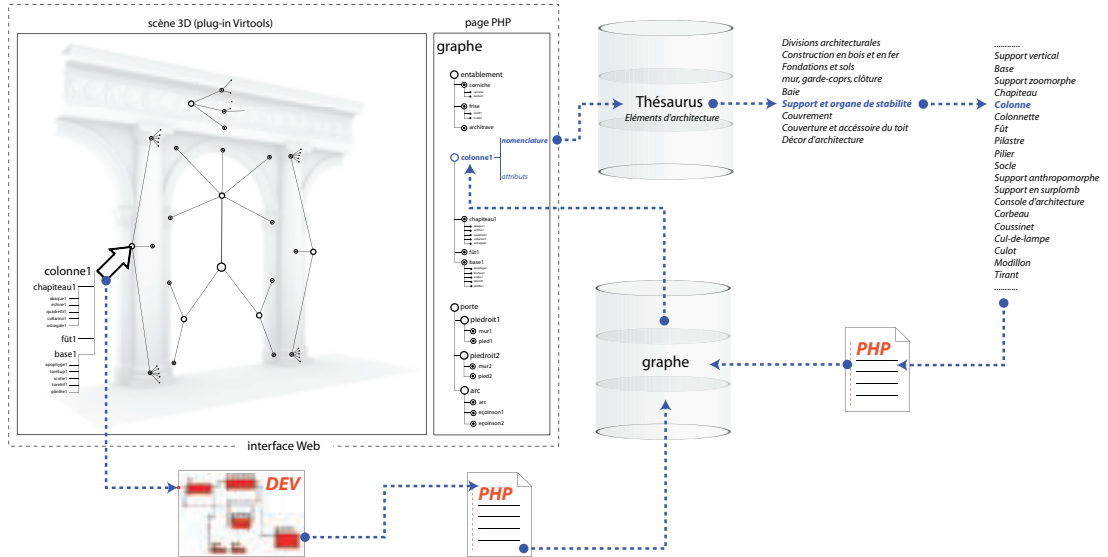


Figure 88. Schéma du fonctionnement de l'outil de nomenclature par thésaurus

7.4.3 Choix d'un système de représentation

Pour le choix d'un système de représentation nous nous basons sur les relations établies entre les entités atomiques d'une décomposition morphologique et leurs différentes représentations enregistrées dans la base de données. La requête posée à la base de données

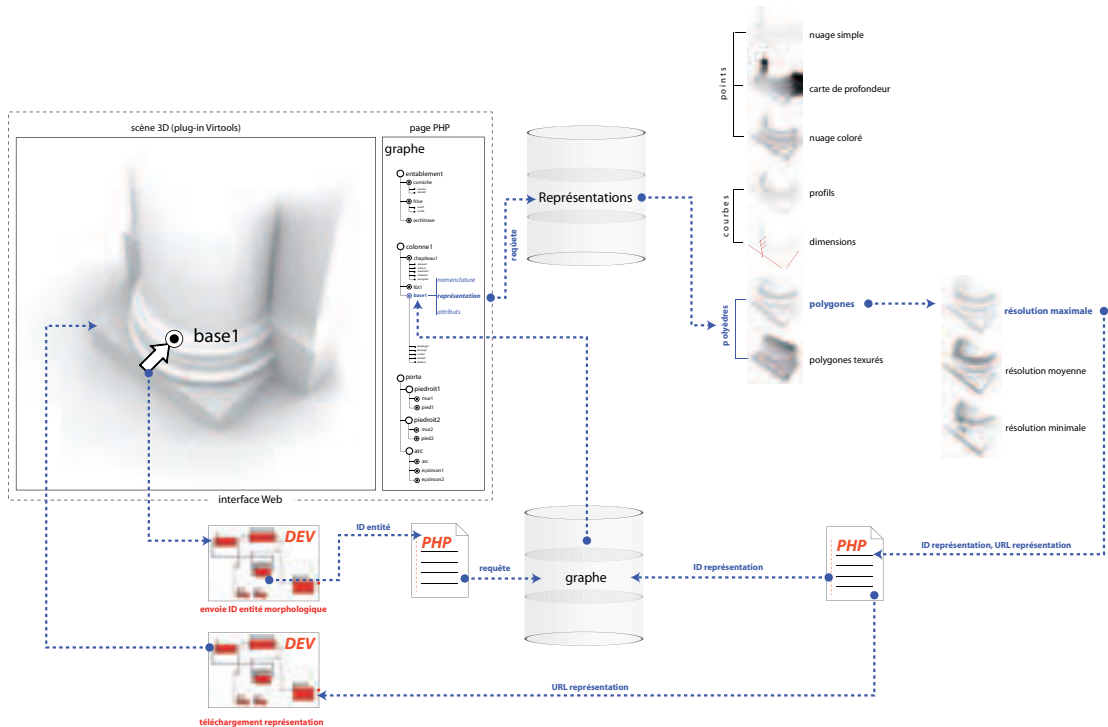


Figure 89. Schéma du fonctionnement de l'outil pour le choix d'une représentation géométrique.

contient l'identifiant de l'entité. Toutes les représentations qui lui sont associées sont alors sélectionnées dans la base et représentées dans la page PHP (figure 89). La distinction introduite entre les notions de représentation et de résolution permet de conduire le choix d'un système de représentation sur la base de deux critères : le premier est l'exigence de description, le deuxième répond aux contraintes liées à l'affichage des entités en temps réel.

7.4.4 Qualification des entités par attributs d'un domaine de connaissances spécifique

Cet aspect du point de vue consiste en un calque thématique que l'on ajoute à la description des éléments. Un système de qualification est constitué d'un descripteur contenant différentes valeurs. Cet attribut est configurable par l'utilisateur. La qualification est alors conduite en associant une valeur du descripteur aux entités prises en examen. Par exemple, pour l'analyse des transformations historiques de l'édifice, on peut créer un descripteur *dates de construction*. On associe à ce descripteur différentes valeurs correspondant aux périodes de construction, enfin on sélectionne des entités dans la scène 3D et on les associe à une date.

7.5 Consultation d'un point de vue

La consultation de la maquette est basée sur l'accès aux aspects organisés en phase de construction d'un point de vue. Les fonctions de consultation consistent (en l'état de développement actuel) principalement à observer et manipuler des représentations géométriques de l'édifice, et/ou à rechercher des informations qui lui sont associées. Une fois une entité (ou sa représentation géométrique) sélectionnée dans la scène 3D, une procédure envoie une requête dans la base de donnée et affiche dans la page PHP les informations qui lui sont associées. Ces informations sont organisées en quatre groupes distincts (figure 90).

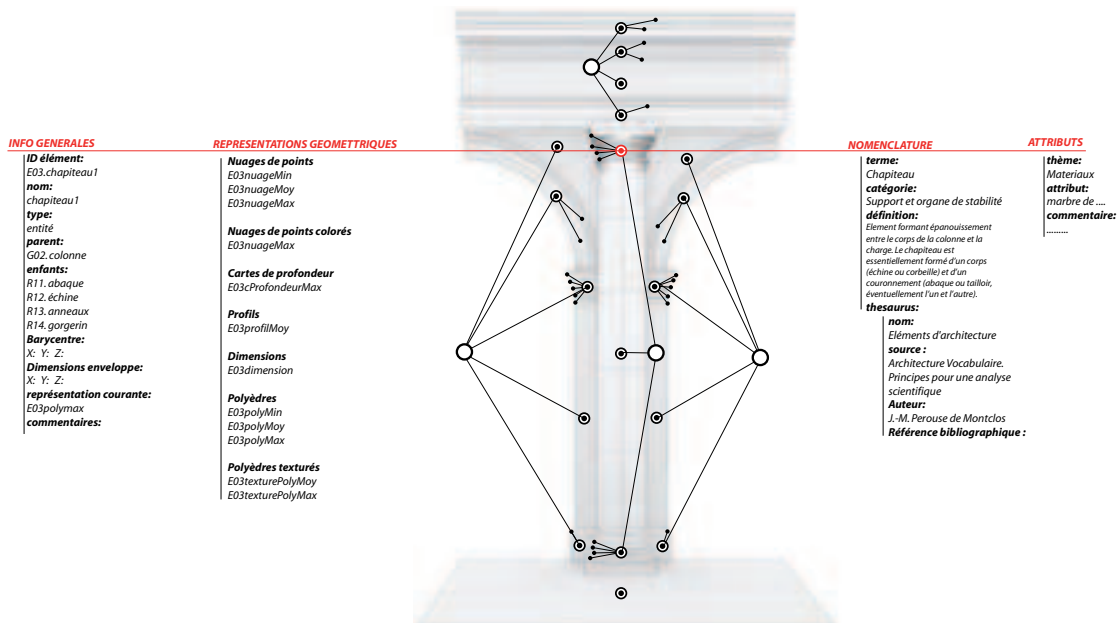


Figure 90. Ensemble des informations hétérogènes associées à une entité morphologique.

- Le premier groupe contient les *informations générales* sur l'élément (position, entités reliées, etc.).
- Le deuxième groupe contient les informations relatives à sa *représentation géométrique* actuelle. Par exemple, pour une représentation polyédrique simple nous retrouvons le volume, pour une représentation par profil nous retrouvons l'abaque d'informations dimensionnelles.
- Un troisième groupe contient le *terme du thesaurus* qui définissent l'entité.
- Un quatrième groupe contient un *attribut qualificatif* (valeur) relatif à chaque descripteur créé.

Les relations bilatérales établies entre le jeu d'information et les éléments qui décrivent la morphologie de l'objet permettent d'effectuer des recherches d'informations dans deux sens : la recherche d'éléments de la représentation de l'édifice en fonction d'une requête dans la base de données ou la recherche d'informations en fonction d'une sélection d'éléments dans la scène 3D.

7.5.1 Recherche d'éléments de la morphologie à partir d'une requête dans la base de données.

Le système permet des recherches basées sur différents critères en fonction des qualifications associées à la description de l'édifice.

On distingue :

- *La recherche par thesaurus*. Il s'agit d'un tri d'éléments en fonction de leur terme de vocabulaire. L'utilisateur sélectionne un item parmi les termes utilisés dans la description ;
- *La recherche par dimensions*. Il s'agit d'un tri dans la base de données basé sur l'attribut dimension de l'enveloppe englobant l'entité. La recherche peut être conduite sur la base d'une dimension spécifique (par exemple « largeur ») ou sur la base des trois dimensions simultanément ;
- *La recherche par représentation*. Il s'agit d'une recherche pour consulter les aspects particuliers à un système de représentation. Par exemple on recherche les éléments de type *nuage de points* dont le *nombre de points* est supérieur à une valeur donnée. D'autres critères peuvent être le volume de la primitive, la date de création, etc. ;
- *La recherche par attribut*. Ce type de recherche (actuellement en cours de développement) permet la recherche d'entité en fonction de valeurs d'un descripteur.

Les résultats de la recherche sont affichés en deux étapes :

La première consiste à présenter les enregistrements qui répondent aux critères dans la page php sous forme d'une liste.

La seconde identifie dans l'espace 3D les entités sélectionnées. Ce type d'affichage est basé sur une procédure qui envoie à la scène 3D par javascript une liste d'identifiants résultant de la requête. Les entités correspondantes sont alors signalées dans la scène 3D par un changement de couleur.

Une dernière procédure mise au point permet de rechercher dans l'espace une entité à partir de la sélection de son nom dans la liste des résultats sur la page PHP. La procédure envoie l'identifiant à la scène 3D. Le déplacement de la caméra est alors calculé de façon à ce que le point d'observation se positionne à une distance donnée de l'entité sélectionnée. La procédure ne prend pas en compte pour l'instant la direction d'observation.

7.5.2 Recherche d'informations à partir d'un point d'observation dans la scène 3D

Ce mode d'interrogation permet de formuler une requête dans la base de données en fonction d'un critère spatial. Cette fonction est basée sur la sélection d'éléments à partir d'un point d'observation (figure 91). Pour sélectionner des entités dans la scène, on exploite l'extension spatiale de la pyramide visuelle (*frustum*) du modèle géométrique de la caméra de navigation. Par rapport à une valeur de profondeur (configurable) les entités situées à l'intérieur de la pyramide visuelle sont détectées. La liste des entités repérées (identifiants) est ensuite envoyée comme filtre de requête dans la base de données. Ce type de recherche pourrait être particulièrement utile, par exemple, pour la consultation de sources documentaires associées aux entités. Pour donner un exemple, on peut demander à la base de données d'afficher toutes les photographies reliées aux éléments visibles dans la scène 3D à partir d'un point d'observation.

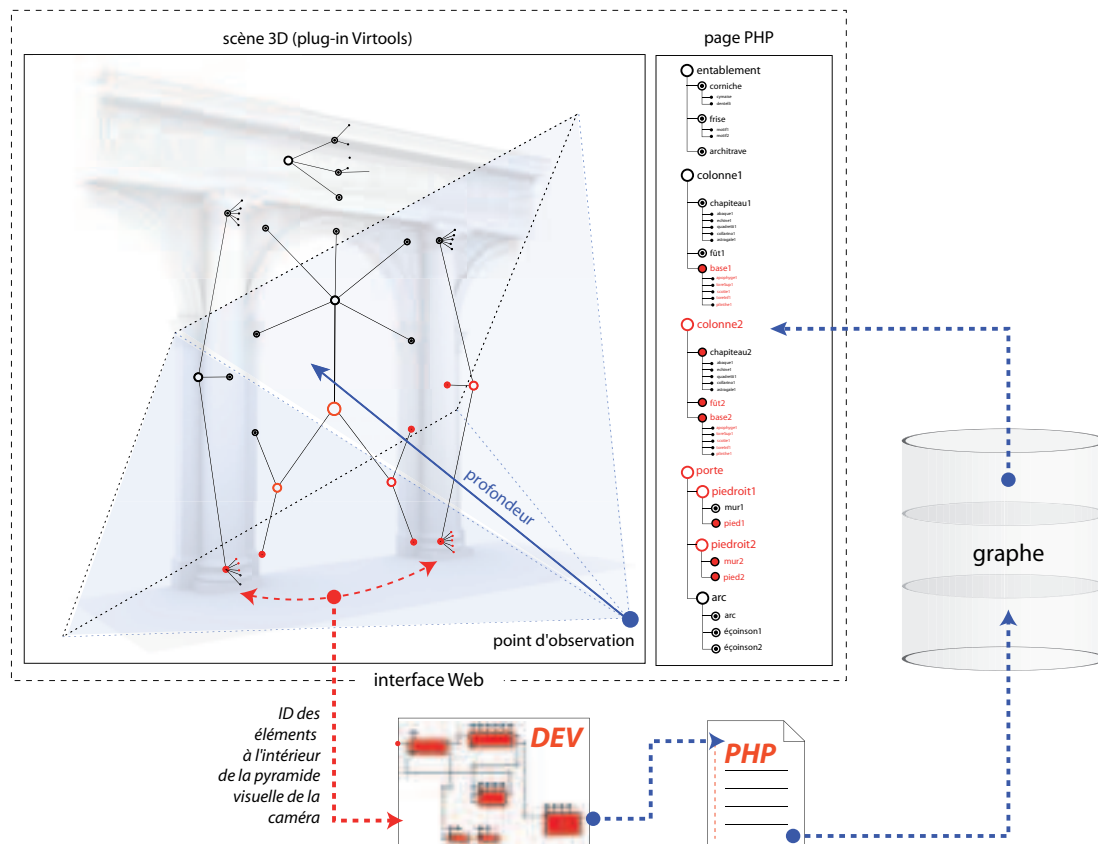


Figure 91. Recherche d'entités à partir d'un point d'observation.

8. Conclusions et perspectives

Les problèmes abordés dans cette thèse ont concernés la collecte, la structuration, l'interprétation et la consultation des données du relevé dans le but de produire des représentations multiples de l'édifice. Nous pensons que l'approche proposée répond à un certain nombre d'exigences du domaine de la représentation architecturale. Par contre, elle présente différentes lacunes qui doivent être analysées de façon approfondie. Dans un premier temps, nous analyserons notre contribution en mettant en évidence ses faiblesses et limites, dans un deuxième temps nous soulignerons ses points forts qui nous inspirent des perspectives de recherche.

8.1 Limites

8.1.1 Consolidation hybride de différentes sources

La solution explorée et implémentée pour la mise en place de photographies sur le nuage de points utilise l'algorithme de [Tsai, 1986]. Cet algorithme est issu du domaine de la vision par ordinateur et permet la calibration d'une caméra par l'estimation de ses paramètres externes et internes à la fois. Or, si cela offre une flexibilité importante (on peut calculer les paramètres de photographies prises avec des caméras d'amateur), de l'autre côté cela limite fortement la précision des résultats, car par exemple la valeur de la distance focale peut être confondue avec une translation sur l'axe principale de la caméra. Des méthodes plus robustes [Abdel-Aziz, et al., 1971 ; Hatze, 1988] devront donc nécessairement être prises en compte surtout en vue d'exploiter les photographies orientées pour l'extraction de coordonnées additionnelles.

8.1.2 Reconstruction des surfaces à partir de profils pertinents

En ce qui concerne la reconstruction des surfaces, notre approche offre une solution qui s'appuie sur des outils complètement manuels (sauf pour la reconstruction des bas-reliefs). Si les principes identifiés peuvent se révéler efficaces, les procédures implémentées manquent encore de précision en phase d'orientation des plans en intersection avec le nuage de points. Des méthodes pour l'estimation automatique de plans devront être étudiées pour fournir un contrôle géométrique adéquat à la phase d'extraction de profils. Pour cette phase on pourrait s'appuyer sur la méthode des moindres carrés qui permet de comparer des données expérimentales à un modèle mathématique censé décrire ces données. Dans ce sens il serait également utile d'évaluer des procédures automatiques d'estimation de profils caractéristiques [Deveau et al. 2005] par les méthodes des moindres carrés mobiles [Lee, 2000]. Cette implémentation pourrait être menée en utilisant les atomes géométriques présentés dans la section (5.3.3.3) à la place de courbes génériques.

8.1.3 Instanciation de primitives architecturales dans le nuage de points

La validité de cet aspect de l'approche devra, avant tout, être testé sur un nombre

important d'applications et comparé à des résultats obtenus par d'autres méthodes de reconstruction. En effet, même si la restitution de la forme s'appuyant sur des modèles à priori peut se révéler une solution intéressante pour la comparaison dimensionnelle d'éléments répétitifs, son implémentation présente un nombre considérable de problèmes non encore réglés. Principalement, l'identification des plans de construction dans le nuage de points pour la déformation des profils décrivant la primitive. Cette phase s'appuie actuellement sur des estimations arbitraires de l'utilisateur au moment du positionnement de la primitive dans le nuage de points. Dans le but de rendre la procédure d'instanciation plus robuste il faudra s'intéresser aux techniques de *best fit* (ajustement d'un modèle sur un ensemble de points le représentant). Ces techniques pourront être prises en compte pour l'ajustement de la primitive en fonction de différents aspects : surfaces [Eck et al., 1996], profils caractéristiques [Plass et al., 1983] ou historique de construction [Ramamoorthi et al., 1999]. Dans le même sens, les méthodes utilisant les grammaires des graphes pour la reconstruction automatique des formes [Fuchs et al., 2000] pourront être prises en compte.

8.1.4 Description sémantique et structuration d'informations

Le principe introduit pour la description de l'édifice a été expérimenté seulement sur des édifices du langage classique dont la composition architecturale est caractérisée par une organisation claire des éléments qui les composent. Plusieurs problèmes seront sûrement à aborder pour l'adéquation de l'outil de description par graphes à d'autres types d'artefacts dont la composition ne présente pas ses qualités de clarté. Un autre problème concerne la gestion de plusieurs modèles de description du même édifice. Le système de consultation permet pour l'instant de gérer une seule description à la fois. Cela constitue une limitation importante dans le but de pouvoir interroger la maquette en fonction de plusieurs points de vue. Comme nous l'avons expliqué, différentes décompositions peuvent être menées sur la morphologie restituée de l'édifice. Il faudra probablement prendre en compte la structuration des descriptions sémantiques aussi en fonction de critères spatiales : par exemple en s'appuyant sur la comparaison des enveloppes englobant les entités isolées au fin de pouvoir interroger le système en croisant plusieurs points de vue.

8.2 Perspectives de recherche

Les thématiques que nous avons traités dans les chapitres 6 et 7 s'inspirent de l'hypothèse qui considère la maquette 3D de l'édifice comme moyen d'accès privilégié aux informations [Dudek et al., 2003]. Cette hypothèse a été considérée devant deux difficultés principales :

- Utiliser les résultats d'un processus de restitution tridimensionnelle d'éléments à partir d'un relevé d'architecture ;
- Introduire différents niveaux de lecture de la morphologie observée sans être contraint à une structure de description et à un système de représentation uniques.

Nous avons aussi vu qu'au-delà des relevés, une grande quantité de données hétérogènes recueillies au cours de l'analyse d'un bâtiment constituent le support d'analyse exploité par diverses disciplines. L'édifice, en tant qu'expression de l'homme, est avant tout objet de connaissance dont l'étude mobilise des observations multiples liées à la sphère sociale, culturelle, historique et environnementale. En continuité avec le sujet de cette thèse, la perspective de recherche que l'on souhaiterait aborder concerne l'exploration des relations que l'on peut établir entre la description de l'édifice (dans ses dimensions morphologique,

structurelle et sémantique) et les univers de connaissances auxquels sa compréhension doit faire appel. Au-delà des aspects conceptuels et techniques, en partie abordés dans ce document, les difficultés résident surtout dans la maîtrise de l'hétérogénéité et de la complexité des aspects dont on veut tenir compte. La compréhension d'un édifice ne peut être abordée, qu'en tenant compte de la multitude des facteurs qui participent à son identité: contexte social, historique et environnemental. Par ailleurs, la validation des méthodes proposées ainsi que les implémentations informatiques développées, doivent nécessairement être conduites sur l'étude de cas concrets. En définitive, il s'agirait de mettre en oeuvre un système d'informations à l'échelle architecturale qui intègre : la documentation de son état actuel, les analyses de son état de conservation, l'interprétation de sa nature géométrique en cohérence avec un univers de connaissances spécifiques et enfin l'analyse des facteurs environnementaux qui ont déterminé son évolution dans le temps.

Pour exploiter les apports méthodologiques développés dans cette thèse dans le but de créer des liens entre la morphologie de l'édifice et des informations hétérogènes, plusieurs problèmes se posent.

- Premièrement, il faudrait envisager l'analyse des mécanismes de description mises en oeuvre par les spécialistes de différentes disciplines pour la compréhension de l'édifice.
- Deuxièmement, il s'agirait de formaliser les codes de représentation propres à chaque domaine disciplinaire et de définir des stratégies pour les intégrer à la morphologie de l'édifice.

Dans les paragraphes qui suivent nous traçons les lignes principales que nous souhaitons développer en relations avec les objectifs énoncés ci-dessus. Ces lignes sont organisées à l'image de la démarche que nous jugeons appropriée à l'étude du patrimoine bâti : documenter, comprendre et diffuser. Le premier paragraphe concerne la collecte, la qualification et l'intégration de données à référence spatiale à l'intérieur d'un système de consultation de l'état actuel d'un bâtiment. Le second s'intéresse à l'analyse de l'état de conservation de l'édifice. Le troisième et le quatrième paragraphe s'intéressent aux problèmes de restitution de la nature géométrique de l'édifice et de ses transformations dans le temps.

8.2.1 La documentation de l'état actuel de l'édifice

Partant du constat qu'une acquisition exhaustive de la morphologie de l'édifice est possible seulement en utilisant une intégration des techniques de relevé, une partie de la thèse s'est concentrée sur le problème de l'orientation de photographies sur un nuage de points issus d'un balayage laser 3D (section 4.2.2). La solution technique explorée et implémentée pourrait constituer le point de départ pour le développement d'un système à référencement spatial de sources documentaires (photographies, images panoramiques, séquences vidéo, etc.). À partir du principe expérimenté, d'autres modalités de fusion de données peuvent en effet être prises en compte. Une photographie peut par exemple être localisée de façon approximative dans un nuage de points 3D géo-référencé au travers de l'enregistrement des coordonnées GPS de l'appareil photo au moment de la prise de vue. Un raisonnement similaire pourrait intéresser d'ailleurs l'orientation d'images 360° ou encore la reconstruction du mouvement d'une caméra vidéo (tracking vidéo) à l'intérieur de la scène 3D relevée. Au delà des bénéfices que la phase de restitution morphologique pourrait en tirer, cette perspective de recherche permettrait avant tout d'envisager des modalités d'interrogation d'un corpus d'informations descriptives en fonction de critères spatiaux. Ce type de raisonnement pourrait d'ailleurs être

étendue à des échelles plus vastes en prenant en compte l'utilisation de dispositifs pour la prise de photo aérienne à basse altitude (UAV, ballons captifs, etc.).

8.2.2 L'analyse de l'état de conservation de l'édifice

L'analyse de l'état des surfaces s'appuie actuellement sur des représentations bidimensionnelles de la morphologie de l'objet. Les informations issues de ces études associées aux représentations graphiques constituent aujourd'hui le support essentiel pour la documentation de l'état de conservation d'un édifice. Certains projets innovants se concentrent sur l'application des fonctionnalités spécifiques aux SIG à l'échelle de l'édifice (section 7.1.2). Ces systèmes exploitent la représentation graphique comme support d'analyse des phénomènes de dégradation des matériaux et/ou comme base de lecture des couches stratigraphiques (figure 92). En exploitant le cadre de structuration de la maquette 3D que nous avons étudié une perspective pourrait consister à créer des liens (projection d'informations graphiques et alphanumériques) entre ces supports d'analyse bidimensionnels et la maquette 3D de l'édifice. Au-delà des problèmes à caractère méthodologique auxquels seulement une approche pluridisciplinaire pourrait faire face, comme par exemple la formalisation d'un code graphique pour l'interprétation des résultats des analyses en cohérence avec les conventions spécifiques du domaine, de nombreuses difficultés doivent être évaluées :

- La définition de procédures de transformations projectives nécessaires au plaquage de ces entités graphiques (symboles, aires polygonales, etc.) sur les volumes de la représentation 3D ;

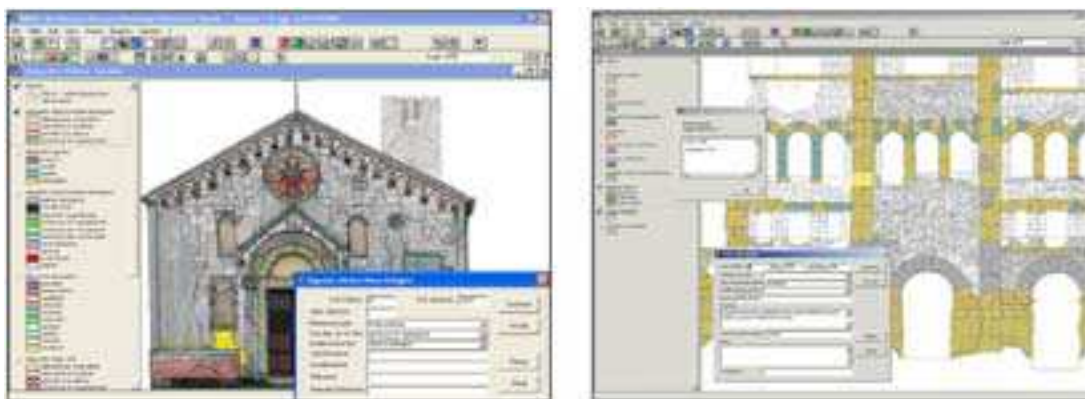


Figure 92. Deux captures d'écran du système ARKIS. Dans [Salonia et al. 2000]

- L'affichage et le contrôle dynamique dans l'espace 3D de plusieurs calques thématiques à la fois ainsi que leur cohérence topologique.

8.2.3 La formalisation des connaissances architecturales pour la compréhension et la restitution de la nature géométrique de l'édifice

En ce qui concerne le problème de la restitution géométrique d'édifices à partir d'un relevé, un apport significatif de la thèse a concerné le développement d'un formalisme pour la représentation paramétrique des éléments d'architecture classique. Pour l'instant nos efforts se sont concentrés sur l'analyse et la restitution d'éléments architecturaux moulurés. D'autres

courants stylistiques sont susceptibles d'être étudiés par une formalisation de ce type. Pour la restitution de la forme architecturale, nous utilisons les plans de construction nécessaires à la représentation de l'élément comme plans pour l'extraction de profils pertinents du nuage de points. Il s'agit de conduire la restitution s'appuyant sur une observation qui prend en compte à la fois le relevé et la représentation de l'élément architectural. Or, au-delà des systèmes de description s'appuyant sur la complémentarité de plans orthogonaux, la formalisation d'autres méthodes de contrôle géométrique de la forme ou de la représentation de l'espace doivent être étudiées, par exemple, la stéréotomie, la perspective ou encore l'anamorphose. Cet intérêt porté aux principes sous-jacent à la construction géométrique de la forme architecturale justifie notre démarche : comprendre les connaissances relatives à l'édifice et les exploiter pour le mesurer.

Cette démarche oblige donc à des observations d'ordre plus complexe que la transcription géométrique de la forme relevée. Il faut en effet tenir compte des relations entre les éléments qui composent le bâti. Cette thèse s'est concentrée sur la formalisation des relations partie-ensemble dans le but d'organiser la description morphologique en fonction du vocabulaire de l'architecte. D'autres relations sont par contre susceptibles d'être analysées à des fins de formalisation des connaissances. Il s'agit principalement des relations de composition qui reposent sur un ensemble de règles contrôlant le positionnement et le dimensionnement relatifs d'un ensemble d'éléments dans un tracé géométrique général (figure 93). Cette démarche peut se révéler intéressante à la fois pour la compréhension de la composition architecturale qui caractérise un édifice existant ainsi que pour le développement ou la validation d'hypothèses de restitution d'un édifice partiellement détruit ou disparu. Il s'agirait de formaliser les systèmes de proportions qui intéressent les édifices d'une grande partie de

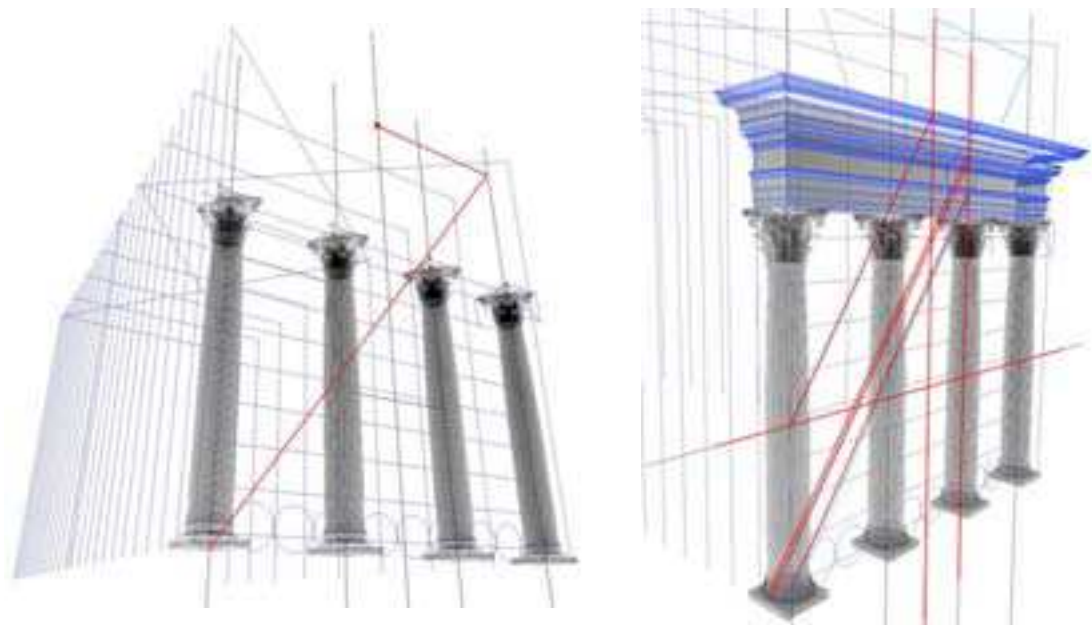


Figure 93. Formalisation des relations de composition pour l'étude du pronaos d'un temple tétrastyle (avec quatre colonnes en façade) d'ordre corinthien.

l'histoire de l'architecture [Scholfield, 1958]. Ce dernier aspect ouvre la problématique plus vaste de l'utilisation d'une maquette tridimensionnelle comme support pour l'organisation, l'évaluation et le développement d'hypothèses de restitution en histoire de l'architecture.

8.2.4 La maquette 3D comme support pour la consultation, l'évaluation et le développement d'hypothèses de restitution

Les thématiques abordées jusqu'à présent se sont principalement focalisées sur l'observation et l'interprétation du seul état actuel de l'édifice. La restitution de cet état est par contre le point de départ du raisonnement que l'on peut développer pour l'analyse des transformations que l'édifice a subi dans le temps. Plusieurs travaux [Frischer, 2003; Lecocq, 2003], notamment dans le domaine de l'archéologie, se sont concentrés sur la représentation d'hypothèses de restitution d'édifices disparus ou partiellement détruits s'appuyant sur les techniques d'infographie 3D. Une réflexion est par contre nécessaire à ce propos. En effet, si pour la restitution de l'état actuel d'un édifice la demande de réalisme peut trouver des justifications dans la volonté de pouvoir apprécier l'état de conservation des matériaux qui le composent, en ce qui concerne la représentation des états antérieurs, il est important de réfléchir sur l'adéquation des techniques de représentation par rapport à la rigueur qu'une



Figure 94. Des modèles théoriques (en filaire) instanciées sur la morphologie relevée des vestiges du théâtre romain d'Arles.

visualisation scientifique requiert. Dans une expérience menée autour des vestiges du théâtre antique d'Arles, nous avons souligné l'importance de véhiculer dans la représentation de l'édifice le degré d'incertitude qui est à la base de sa restitution hypothétique.

Cette approche est fondée sur le choix d'associer à la représentation de l'édifice une indication de l'état de connaissance qui justifie sa restitution [Dudek et al. 2003]. Ce type de raisonnement peut par exemple être appliqué à la représentation d'hypothèses de restitution issues d'une comparaison entre des modèles théoriques et des fragments relevés (figure 94).

Dans ce sens, la notion de multi-représentation pourrait jouer un rôle important : organiser autour de la morphologie de l'édifice un ensemble de représentations correspondant aux différents niveaux d'approfondissement de sa restitution hypothétique. Cela pose des problèmes de nature différente.

Premièrement, il s'agit d'intégrer à la méthode de description par graphes une dimension temporelle. Cela nécessite d'être capable de structurer des graphes de description tout au long de l'historique des transformations du bâtiment et de les confronter (ajout, modification, suppression d'entités) à des états temporels établis. Différents modèles de données [Renolen, 1997; Tryfona et al., 1999] pourraient être évalués. Les entités composant le graphe de description pourraient alors être le dénominateur commun qui relie les représentations hypothétiques de la forme (en fonction de l'avancement du raisonnement de restitution) aux sources documentaires qui les justifient. Dans la figure 95, on peut voir une application d'un raisonnement de ce genre à la structuration des représentations tridimensionnelles des transformations temporelles de la Cour de la Sorbonne à Paris. Il s'agit d'une modélisation spatio-temporelle qui décrit les évolutions du bâtiment au travers d'un ensemble d'événements (construction, démolition, superfétation, destruction, etc.) qui sont distribuées le long d'un arc temporel.



Figure 95. Restitution de deux états d'évolution de la cour de la Sorbonne. À gauche l'état 4 (du milieu des années 40 du XVII^{ème} siècle au 1694). À droite l'état 5 (de juillet 1626 à juillet 1628). Travail de stage du Master SIS (Science de l'Information et des Systèmes) de l'Université d'Aix-Marseille III (2005-2006). Etudiante : C. Stefani, tuteurs : P. Veron et L. De Luca.

Deuxièmement, il faudra établir un code de représentation en fonction du degré d'incertitude que la description de l'élément contient (déduite de la mesure de vestiges,

s'appuyant sur des modèles théoriques ou résultant de la comparaison avec d'autres édifices).

Un troisième problème à traiter concerne la possibilité d'organiser autour d'un même état temporel, plusieurs hypothèses de restitution (figure 96). À ce propos, la relation entre la représentation de la morphologie de l'édifice et les sources documentaires exploitées pour sa restitution hypothétique devient évidente. En effet, tout raisonnement de restitution s'appuie à la fois sur des documents historiques, sur des données métriques relevées, mais aussi sur des raisonnements qui investissent d'autres domaines disciplinaires. Un système d'informations de ce genre pourrait alors devenir un outil d'aide à la comparaison d'hypothèses utile aux historiens mais aussi indiqué pour la diffusion culturelle.

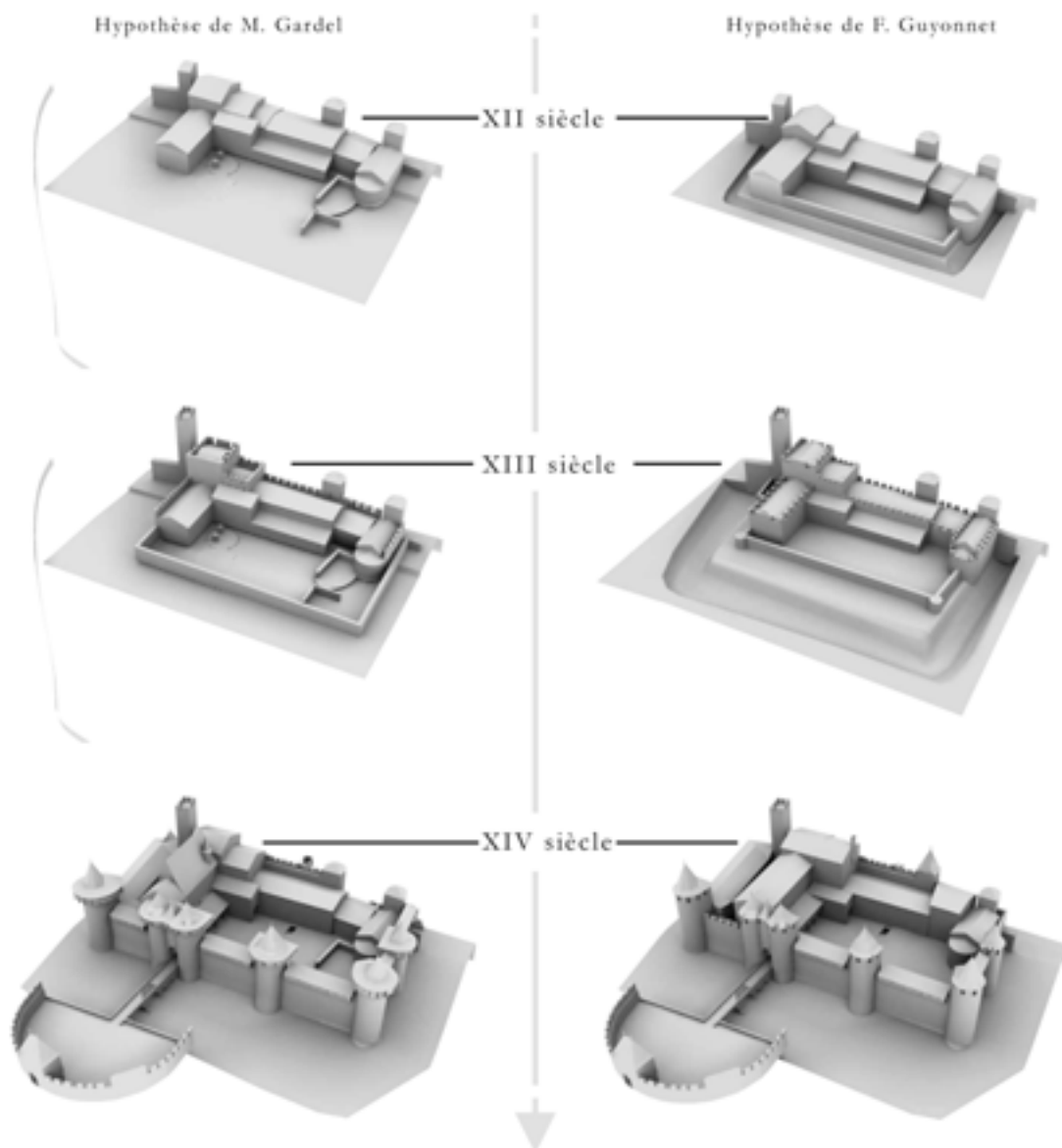


Figure 96. Comparaison d'hypothèses de restitution de l'évolution du Château Comtal à Carcassonne. Travail

*de stage du Master SIS (Science de l'Information et des Systèmes) de l'Université d'Aix-Marseille III (2005-2006).
Etudiant : C. Busayarat, tuteurs : M. Florenzano et L. De Luca.*

8.2.5 Terrains d'expérimentation

Les expériences de relevé et représentation auxquelles nous avons collaboré jusqu'à présent concernaient principalement le patrimoine architectural monumental (voir annexe C). Dans ce cas, l'abondance de théorisation ou d'études déjà menées facilite beaucoup la phase de formalisation des connaissances nécessaires à la restitution de la nature géométrique de l'édifice. Un autre type de terrain d'expérimentation concerne l'étude du patrimoine vernaculaire, qui ne présente pas de caractères codifiés par la théorie de l'architecture, et qui nécessite une étude plus approfondie du contexte social et environnemental. En effet, contrairement aux monuments historiques, ce dernier type de patrimoine nécessite une enquête de terrain qui s'appuie sur la comparaison de différents types architecturaux pour pouvoir en extraire les principes de composition. C'est le cas d'une expérience à laquelle nous avons participé dans la ville de Kashgar en Chine [De Domenico, 2005]. Ce type d'étude oblige à étendre le champ d'observation à d'autres échelles, notamment celle de la ville et du territoire, et à tenir compte aussi des facteurs environnementaux qui participent à la définition de typologies d'habitat en milieux climatiques difficiles. Cela ouvre le problème du croisement d'échelle, problème sûrement intéressant en ce qui concerne les stratégies de relevé et d'intégration de données et représentations hétérogènes.

8.3 Réflexions conclusives

En conclusion des thématiques que nous venons de présenter, des dernières réflexions émergent par rapport aux normes¹ et aux systèmes actuels de documentation des monuments historiques en fonction des possibilités offertes par les outils numériques ainsi que des politiques émergentes pour le partage de l'information à caractère patrimonial. Au même titre que la numérisation 2D, la numérisation 3D répond à trois préoccupations : d'abord la conservation, par la prise «d'empreinte numérique» dont l'enregistrement constitue une archive qui, par les différentes exploitations que nous venons de présenter, peut fournir un modèle géométrique destiné à représenter la morphologie des édifices relevés ainsi que leur aspect ; ensuite, l'analyse des différents caractères qui constituent l'identité de cet édifice par rapport aux disciplines qui l'étudient ; enfin la valorisation, par sa capacité à donner à voir, à revoir et donc à comprendre par le plus grand nombre l'objet étudié sur des supports variés. L'enregistrement du patrimoine, sa documentation et la gestion d'informations le concernant sont en effet les activités essentielles du processus de conservation d'une ressource culturelle. Ces activités doivent alors être supportées par une base d'informations concernant la compréhension, l'évaluation, la prise de décision et la valorisation de la ressource. Ce c'est que l'on pourrait appeler un système d'informations architecturales.

1. Charte de Venise. Article 16 : *‘ Les travaux de conservation, de restauration et de fouilles seront toujours accompagnés de la constitution d'une documentation précise sous forme de rapports analytiques et critiques illustrés de dessins et de photographies. Toutes les phases de travaux de dégagement, de consolidation, de reconstitution et d'intégration, ainsi que les éléments techniques et formels identifiés au cours des travaux y seront consignés. Cette documentation sera déposée dans les archives d'un organisme public et mis à la disposition des chercheurs; sa publication est recommandée. ’*

Bibliographie

- [Abmayr et al., 2004] Abmayr T., Härtl F., Mettenleiter M., Heinz I., Hildebrand A., Neumann B., Fröhlich C. *Realistic 3D reconstruction – combining laserscan data with RGB color information*. Proceedings of ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol XXXV, Part B. Istanbul 2004. pp.198-203.
- [Alberti, 1452] Alberti L. B. *De re aedificatoria libri decem*. Le vatican, biblioteca Apostolica Vaticana. 1452
- [AlKhalil et al.,2002] AlKhalil O., Grussenmeyer P. *Solutions for exterior orientation in photogrammetry, a review*. The photogrammetric record, an international journal of photogrammetry, ISSN 0031-868X, Vol. 17, N°100, October 2002, pp. 615-634.
- [Allen et al., 2004] Allen P., Feiner S., Troccoli A., Benko H., Ishab E., Smith B. *Seeing into the Past: Creating a 3D modeling pipeline for archaeological Visualization*. Proceedings of Second International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT). 2004.
- [Alshawabkeh et al., 2004] Alshawabkeh Y. Haala N. *Integration of digital photogrammetry laser scanning for heritage documentation*. In ISPRS, volume 35, 2004. pp. 593–598.
- [American Society of Photogrammetry, 1980] American Society of Photogrammetry, *Manual of Photogrammetry*, Fourth Édition, 1980
- [Baltzakis et al., 2002] Baltzakis H., Argyros A., Trahanias P. *Fusion of range and visual data for the extraction of scene structure information*. Proceedings of ICPR, 2002. pp. 7–11.
- [Barbaro, 1556] Barbaro D. *I dieci libri dell'architettura di M. Vitruvio*. Venise, 1556.
- [Bernardini et al. 2002] F. Bernardini, H. Rushmeier, I.M. Martin, J. Mittleman, G. Taubin, *Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta*. IEEE Computer Graphics & Applications, 22(1), 2002. pp. 59-67.
- [Biermann et al, 2003] Biermann V., Borngässer Klein B., Evers B., Freigang C. Grönert A., Jobst C., Kremeier J., Lupfer G., Paul J., Ruhl C., Sigel P., Stewering R., Thoenes C., Zimmer J. *Théorie de l'architecture. De la Renaissance à nos jours*. Tashen, Köln, 2003.
- [Blaise, 2003] Blaise J-Y. *Le formalisme objet appliqué à l'étude de l'edifice patrimoniale: Problèmes de modélisation et d'échanges de données sur le réseau Internet*. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III, Spécialité Automatique et Informatique, 2003.
- [Blum, 1550] Blum H. *Von den fünff Säulen*. Zurich, 1550.
- [Boehler et al., 2002a] Boehler W., Marbs A. *3D Scanning Instruments*. Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording. Corfou, 2002

- [Boehler et al., 2002b] Boehler W., Heinz G., Marbs A., Siebold M. *3D Scanning Software : an introduction*. Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording. Corfu, 2002.
- [Boehler et al., 2003] Boehler W., Bordas V., Marbs A. *Investigating Laser Scanner Accuracy*. Proceedings of The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/C15, pp. 696-701.
- [Bonora et al., 2003] Bonora V., Chielli A., Spano A., Testa P., Tucci G. *3D metric-modelling for knowledge and documentation of architectural structures (Royal Palace in Turin)*. Proceedings of ISPRS International Workshop. Vision Techniques for digital architectural and archeological archives, Ancona, Italy, 2003
- [Borghese et al. 2000] Borghese A., Ferrari S. *A Portable Modular System for Automatic Acquisition of 3-D Objects*. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 49, No.5, 2000. pp. 1128-1136.
- [Borshukov, 97] Borshukov D. *New algorithms for Modeling and Rendering Architecture from Photographs*. M.S Thesis, EECS department, UC Berkeley, 1997.
- [Bryan et al., 2004] Bryan P.G., Barber D.M., Mills J.P. *Towards a standard specification for terrestrial laser scanning in cultural heritage*. Proceedings of The XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004.
- [Buehrer et al., 2001] Buehrer T, Li S., Gruen A., Fraser C., Ruther H. *Photogrammetric reconstruction and 3D visualisation of Bet Giorgis, a rock-hewn church in Ethiopia*. Proceedings of Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, Sites - Traditional and Modern Methods. CIPA International Symposium, University of Potsdam, Germany, 2001
- [Carbonnell, 1968] Carbonnell M. *L'histoire et la situation presente des applications de la photogrammetrie a l'architecture*. Etude sur la photogrammetrie appliquee aux monuments historiques. Application of photogrammetry to historic monuments. ICOMOS, Saint-Mande, France, 4-6, VII, 1968.
- [Catmull, 1975] Catmull E. *Computer display of Curved Surfaces*. Proceedings of the Conference on computer graphics, pattern recognition and data structures. Los Angeles 1975. pp. 11-17.
- [Chen, 1995] Chen. S.E., QuickTime VR – An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation, Proceedings of SIGGRAPH 1995. pp.29-38.
- [Chitam,1998] Chitam R. *Gli ordini classici in Architettura*. Hoepli, 1998.
- [Cipolla et al. 1999] Cipolla R., Robertson D., Boyer E. *Photobuilder – 3D models of Architectural scenes from uncalibrated Images*. Proceedings of the Conference on Multimedia Computing and Systems, June 1999.
- [Curless, 1996] Curless C. *A Volumetric Method for Building Complex Models from Range images* Proceedings of SIGGRAPH, 1996.
- [D'Arcy Thompson, 1994] D'Arcy W. Thompson. *Forme et croissance*. Seuil, 1994.
- [de Cordemoy, 1706] de Cordemoy J-L. *Nouveau traité de toute l'architecture ou l'art de bastir*. Paris, 1706.
- [Davis et al., 2002] Davis J., Marshner S., Garr M., Levoy M. *Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion*. Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission. Padua, Italie, 2002.

- [De Domenico, 2005] De Domenico F., *La sauvegarde numérique du patrimoine construit : L'architecture traditionnelle de Kashgar au Xinjiang, Chine*. Mémoire du DEA "Mondes tropicaux", Université Paris IV. 2005.
- [Deering, 1995] Deering, M. *Geometry Compression*. ACM Proceedings of Siggraph, 1995. pp. 13-20
- [Deliens, 2005] Deliens N. *Developpement d'un outil de conversion de nuages de points 3D pour l'affichage temps réel sur le web*. Rapport de stage. IUT d'Aix-en-Provence, 2005.
- [De l'Orme, 1561] De l'Orme P. *nouvelles inventions pour bien bastir et a petits fraiz*. Paris, 1561.
- [Desargues, 1640] Desargues G. *Bruillon projet d'exemple d'une manière universelle du S.G.D. touchant la pratique du trait à preuves pour la coupe des pierres en Architecture.*, Paris, 1640.
- [Deveau et al. 2005] Deveau M., Letellier G., Paparoditis N. *Automating the extraction of revolution objects from single laser scans of architectural scene*. Proceedings of CIPA, Turin, Italie, 2005.
- [Devebec et al., 96] Devevec P., Taylor C., Malik J., *Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry and image-based approach*. Proceedings of SIGGRAPH 1996, pp. 11-20.
- [Duchaineau et al., 1997] Duchaineau, M., *Real-Time Optimally Adapting Meshes*. Proceedings IEEE Visualization, 1997.
- [Dudek et al., 2003] Dudek I., Blaise J-Y, Beninstant P. *Exploiting the Architectural Heritage's Documentation: A Case Study on Data Analysis And Visualisation*. Proceedings of I-KNOW '03. Graz, Austria, 2003.
- [Eck et al., 1996] Eck M., Hoppe H. *Automatic reconstruction of B-Spline surfaces of arbitrary topological type*. Proceedings of SIGGRAPH, 1996. pp. 325-334.
- [Edelsbrunner, 2001] Edelsbrunner H. *Geometry and Topology for Mesh Generation*, volume 6. Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics. Cambridge University Press, 2001
- [El-Hakim et al., 2003] El Hakim S. F., Beraldin A., Picard M., Vettore A. *Effective 3D Modeling Of Heritage Sites*. Proceedings of 4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Banff, Canada, 2003. pp. 302-309.
- [Falcidieno et al., 1998] Falcidieno B., Spagnuolo M., *A Shape-abstraction paradigm for modelling geometry and semantics*. Proceedinf of the international Conference on Computer Graphics. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1998.
- [Fangi et al.; 2001] Fangi G., Fiori F., Gagliardini G. Malinverni E-S. *Fast and accurate close range 3D modelling by laser scanning system*. Proceedings of CIPA International Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, Sites – Traditional and Modern Methods. Postam, Germany, 2001.
- [Faugeras, 1993] Faugeras O., *Three-Dimensional Computer Vision : A Geometric Viewpoint*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [Fitzgibbon et al., 1998] Fitzgibbon A.W., Zisserman A. *Automatic 3D Model Acquisition and Generation of New Images from Video Sequences*. Proceedings of European Signal Processing conference (EUSPICO '98). Rhodes, Greece. pp. 1261-1269.
- [Floater et al. 1998] Floater M., Iske A. *Thinning Algorithms for Scattered Data Interpolation*. BIT Numerical Mathematics, Vol. 38, No 4, 1998. pp. 705-720.

- [Foley, 2000] Foley J. et al., *Getting There : The Ten Top Problems Left*, IEEE Computer Graphics and Application, Vol. 20, No 1, 2000. pp. 66-68.
- [Forssman, 1978] Forssman E. *Palladio e le colonne*. Bollettino del Centro Internazionale di Studi di Architettura Andrea Palladio. Numéro XX. Vicenza, 1978.
- [Frischer, 2003] Frischer B. *Mission and recent projects of the UCLA cultural virtual reality laboratory*. Proceedings of Virtual Retrospect. Biarritz, 2003. pp. 65-74.
- [Fuchs et al. 2004] Fuchs A., Alby E., Réda B., Grussenmeyer P., Perrin J-P. *Confrontation du relevé laser 3D aux techniques de relevé conventionnelles et de développement d'outils numériques pour la restitution architecturale*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 173/174 (2004-1/2), pp. 36-47.
- [Fuchs et al. 2000] Fuchs F., Le Men H. *Efficient Subgraph Isomorphism with 'A Priori' Knowledge Application to 3D Reconstruction of Buildings for Cartography*. In F.J. Ferri, J.M. Inesta, A. Amin, and P. Pudil, editors, Advances in Pattern Recognition. Proceedings of Joint IAPR International Workshops SSPR and SPR 2000. Lecture Notes in Computer Science, vol.1876, 2000 pp.427– 436.
- [Gaiani, 1999] Gaiani M. *Translating the architecture of the world into virtual reality and vice-versa: 7 years of experimentation with "conservation and representation" at OFF, Officina infografica, Faculty of Architecture, university of Ferrara*. Proceedings of Heritage Applications of 3D Digital Imaging. NRC, Ottawa 1999.
- [Gaiani, 2000] Gaiani M. *Strategie di rappresentazione digitale: modelli per la conservazione e il restauro*. Dans Gaiani M., Beltramini G. *Dall'analogico al digitale: modelli e metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica*, "Quaderni 10 Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali", Scuola Normale di Pisa, n. X, 2000, pp. 47-69.
- [Gardarin, 1999] Gardarin G., *Internet / intranet et bases de données*, Eyrolles, 1999.
- [Genc et al, 1999] Genç S., Atalay V. *Texture extraction from photographs and rendering with dynamic texture mapping*. Proceedings of the 10th International Conference on image Analysis and Processing (ICIAO'99). 1999
- [Ginouvés et al. 1985] Ginouvés R., Martin R. *Dictionnaire methodique d'architecture Grecque et romaine*. Athènes-Rome, I, 1985; II, 1992
- [Gould, 2002] Gould D. *Complete Maya Programming: An extensive guide to MEL and C++API*. Morgan Kaufmann, Paperback, 2002
- [Goulette, 1999] Sémantique formelle de l'espace : Application au raisonnement spatial qualitatif en architecture. *Intellectica : Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*. N°29, 1999. pp. 9-34.
- [Gruen et al. 2002] Gruen A., Remondino F., Zhang L. *Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan*. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol 34, part 5, 2002. pp. 363-368.
- [Grussenmeyer et al., 2001] Grussenmeyer P., Hanke K., Streilein A. *Photogrammetrie architecturale*. Chapitre du livre, *Photogrammétrie numérique*. Éditions Lavoisier-Hermès, 2001
- [Guarnieri et al., 2004] Guarnieri A., Vettore A. El-Hakim S., Gonzo L. *Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey*. Proceeding of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004

- [Guarnieri et al., 2004] Guarnieri A., Remondino F., Vettore A. *Photogrammetry and Ground-based Laser Scanning: Assessment of Metric Accuracy of the 3D Model of Pozzoveggiani Church*. FIG Working Week 2004. TS on “Positioning and Measurement Technologies and Practices I- Laser Scanning and Photogrammetry”. Athens, Greece, 2004
- [Guttman, 1984] Guttman A., R-trees: a dynamic index structure for spatial searching, SIGMOD Record, vol.14, no.2, pp.47-57, 1984
- [Hartley et al., 2003] Hartley R., Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press 2004.
- [Hartley, 1997] Hartley R. *In defense of the eight-point algorithm*. PAMI. Vol. 19/6, 1997. pp. 580-593.
- [Heckbert, 1986] Heckbert P.S. *Survey of texture mapping*. IEEE Computer Graphics and Applications, 6/11, 1986. pp. 56-57.
- [Heckbert, 1998] Heckbert P., *Fundamentals of Texture Mapping*, Master’s thesis. Technical Report No. UCB/CSD 89/516. Computer Science Division, University of California, Berkeley.
- [Heikkila et al., 1997] Heikkila J., Silven O. *A Four-Step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction*. Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. pp. 1106-1112.
- [Heine, 1999] Heine E., *High precision building documentation: Element definition and data structuring* Proceedings of The ICOMOS & ISPRS Committee for the Documentation of Cultural Heritage, Working Group II, Recife/Brazil, 1999
- [Herbig et al., 1997] Herbig U., Waldhäusl P. *APIS - Architectural Photogrammetry Information System*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII, Part5C1B, 1997. pp. 23-27
- [Hoppe, 1997] Hoppe, H. *View-Dependent Refinement of Progressive Meshes*. ACM Proceedings of Siggraph, 1998 pp.189-198.
- [Horn, 1990] Horn B-K-P. *Relative orientation*. International Journal of Computer Vision. Vol. 4/1, 1990. pp. 59–78.
- [Huot, 2000] Huot S. *Reconstruction de bâtiments 3D à partir d’images*. Mémoire de DEA. Ecole des Mines de Nantes, Université de Nantes, 2000.
- [Kadobayashi et al., 2004] Kadobayashi R. et al., *Integrated Presentation System for 3D Models and Image Database for Byzantine Ruins*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12, pp. 187-192. 2003.
- [Klotz et al., 2003] Klotz, A., Zunkel, R. *The World Heritage site Historic Centre of Vienna and the project „Wien-Mitte”: background from the perspective of the City of Vienna*, Sondernummer Perspektiven der Stadt Wien, 2002.
- [Knuyts et al., 2001] Knuyts K., Kruth J-P., Lauwers B., Neuckermans H., Pollefeys M., Li Q., Schouteden J., Van Balen K. Van Gool L., Vergauwen M. *Vision on conservation : Virterf*. Proceedings of International Symposium on Virtual and Augmented Architecture, Springer Verlag. Dublin, 2001. pp. 125 - 132.
- [Kobbelt et al., 2004] Kobbelt L., Botsch M. *A Survey of Point-Based Techniques in Computer Graphics*. Computers & Graphics, Vol. 28, No. 6, 2004. pp. 801-814.
- [Kraus et al., 1997] Kraus K., Waldhau P. *Manuel de photogrammétrie : principes et procédés fondamentaux*. Hermes, 1997

- [Krauss, 2003] Krauss K. *From Digital Elevation Model to Topographic Information System*. In: Photogrammetric Week '95/ Dieter Fritsch u. Dierk Hobbie (Eds.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1995, pp. 277 - 285.
- [Kumar et al., 1994] Kumar R., Hanson A. *Robust Methods for Estimating Pose and a Sensitivity Analysis*. CVGIP-Image Understanding. Vol. 60, No. 3, 1994. pp 313-342.
- [Lecocq, 2003] Lecocq F. *Reconstruction virtuelle de Rome antique*. Proceedings of Virtual Retrospect. Biarritz, 2003. pp. 77 - 84.
- [Lee, 2000] Lee I.K. *Curve reconstruction from unorganized points*. In *CGAD*, Vol. 17, 2000. pp. 161–177.
- [Léon, 1997] Léon J-C. *Structure d'un environnement de Conception Multi-vues et Multi-représentation*. Actes des Journées Modeleurs Géométriques. Grenoble, 1997.
- [Levi-Strauss, 1958] Lévi-Strauss C., *Anthropologie structurale*, Plon, 1958.
- [Levoy, 1999] Levoy M.. *The Digital Michelangelo project*. Proceedings of the 2th International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling. Ottawa, Canada, 1999.
- [Lichtenstein, 1989] Lichtenstein J. *La couleur éloquente*. Flammarion 1989.
- [Liebowitz et al., 99] Liebowitz D., Criminisi A., Zisserman A., *Creating Architectural Models from Images*. Proceedings of Eurographics 1999, Computer Graphics Forum, Volume 18, 1999. pp. 39-50.
- [Lingua et al., 2003] *Digital Photogrammetry : a standard approach to cultural heritage survey*. Proceedings of ISPRS International Workshop. Vision Techniques for digital architectural and archeological archives, Ancona, Italy, 2003.
- [Lucas et al., 1995] Lucas M., Desmontils E. *Les modeleurs déclaratifs*. Revue Internationale de CFAO et d'Informatique graphique, Vol. 10(6).1995. pp. 559-586.
- [Malinverni et al., 2003] Malinverni E.S., Fangi G., Gagliardini G. *Multi-resolution 3D model by laser data*. ISPRS Archives Vol. XXXIV part 5/W12 Commission V. 2003. pp. 219-224.
- [Marbs et al., 2001] Marbs A., Heinz G., Boehler W. *The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording*. Proceedings of CIPA International Symposium. Potsdam, Germany 2001.
- [McMillan, 1997] McMillan L., *An Image-Based Approach to Three-Dimensional Computer Graphics*, Ph.D. Dissertation. UNC Computer Science Technical Report TR97-013, University of North Carolina, April 1997.
- [Mencel et al., 1998] Mencel R., Mueller H. *Interpolation and Approximations of surfaces from Three-Dimensional Scattered Data Points*. State of the Art. Proceedings of Eurographics Conference. Lisbon, Portugal 1998
- [Michel, 2002] *Site Web: <http://rain.prhosting.com/benoitmi/infographie/index.html>*
- [Migliari, 2000]. Migliari R., Docci L. *Geometria e Architettura*. Gangemi editore, 2000.
- [Mitchell, 1990] Mitchell W.J. *The Logic of Architecture. Design, Computation, and Cognition*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 1990.
- [Monge, 1799] Monge G. *Géométrie descriptive*. Paris, 1799. Réimpression: Jacques Gabay, 1989.

- [Oliveira et al., 1999] Oliveira M., Bishop G., McAllister D., *Image-Based Objects*. Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics. 1999. pp. 191-198.
- [Oliveira et al., 2000] Oliveira M., Bishop G., McAllister D., *Relief Texture Mapping*. Proceedings of SIGGRAPH 2000. pp. 359-368.
- [Oliveira, 2002] Oliveira, M., *Image-Based Modeling and Rendering Techniques : A Survey*, RITA, Vol IX/2, 2002
- [Palladio, 1570] Palladio A. *Les quatre livres de l'Architecture*. Edition originale : Venezia , 1570. Réédition : *The four books of Architecture*. Dover publications, 1965.
- [Perouse de Montclos, 1972] Perouse de Montclos. *Architecture vocabulaire. Principes d'analyse scientifique*. Imprimerie Nationale, 1972.
- [Plass et al., 1983] Plass M., Stone M. *Curve-fitting with piecewise parametric cubics*. Proceedings of SIGGRAPH, 1983. pp. 229-239.
- [Pulli, 1999] Pulli K. *Multiview registration for large datasets*. Proceedings of 3D Digital imaging and modeling, 1999.
- [Quintrand et al., 1985] Quintrand P., Autran J., Florenzano M., Fregier M., Zoller J. *La CAO en architecture*. Hermes, 1985.
- [Ramamoorthi et al., 1999] Ramamoorthi R., Arvo J. *Creating generative models from range images*. Proceedings of SIGGRAPH, 1999.
- [Rattner, 1998] Rattner D. *Parallel of the classical orders of architecture*. Acanthus Press 1998.
- [Remondino, 2003] Remondino F. *From point cloud to surface : the modeling and visualizaion problem*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, part 5/W10. ISPRS International Workshop on "Visualization and Animation of Reality-based 3D Models". Tarasp-Vulpera, Switzerland, 2003
- [Renolen, 1997] Renolen A. *Modeling Spatiotemporal Information: The spatiotemporal object model*. Proceedings of ScanGIS, 1997.
- [Rollandin, 2004] Rollandin F. *Proposition d'un système de génération de primitives architecturales*. Stage de recherche du Master Science de l'Information et des Systèmes de l'Université d'Aix-Marseille III. Rapport de stage UMR 694 MAP, 2004.
- [Saint-Aubin, 1992] Saint-Aubin J-P., *Le relevé et la représentation de l'Architecture*, Inventaire Général, E.L.P., 1992.
- [Salonia et al. 2000] Salonia P., Negri A. *ARKIS : An Information System as a Tool for Analysis and Representation of Heterogeneous Data on an Architectural Scale*. Proceedings of The 8-th International conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media. WSCG '2000, Plzen (Czech Republic), 2000.
- [Salemi et al., 2005] Salemi G., Achilli V., Cervato C. *Data acquisition for cultural heritage navigation: integration of panoramic imaging, terrestrial laser scanning and anaglyphs*. Proceedings of the ISPRS working group V/5. Panoramic Photogrammetry Workshop. Berlin, Germany, 2005.
- [Scamozzi, 1615] Scamozzi V. *L'idea della architettura universale*. Venise, 1615.
- [Scholfield, 1958] Scholfield P.H. *The theory of proportions in Architecture*. Cambridge Press, 1958.
- [Sequeira et al. 2001] V. Sequeira, E. Wolfart, E. Bovisio, E. Biotti, J. Goncalves, *Hybrid 3D reconstruction and image-based rendering techniques for reality modeling*. SPIE Vol. 4309, 2001, pp. 126-136.

- [Serlio, 1619] Serlio S. *Tutte l'opere d'architettura et prospettiva*. Venise 1619.
- [Shade et al., 1998] Shade J. et al., *Layered Depth Images*, Proceedings of SIGGRAPH 1998, pp. 231-242.
- [Spaccapietra et al., 2000] Spaccapietra S., Parent C., Vangenot C. *GIS Databases: from Multiscale to Multirepresentation*. Proceedings of the International Workshop on Emerging Technologies for Geo-Based Applications. Ascona, Switzerland, EPFL-DI-LBD Publisher, 2000.
- [Shum et al., 2000] H.-Y. Shum, S.B. Kang. *A Review of Image-based Rendering Techniques*. IEEE/SPIE Visual Communications and Image Processing (VCIP). Perth, 2000. pp. 2-13.
- [Taylor et al., 1996] Taylor C., Debevec P., Malik J., *Reconstructing Polyhedral Models of Architectural Scenes from Photographs*. Proceedings of the European Conference on Computer Vision, 1996. pp. 659-668.
- [Thalmann, 2003] Thalmann D. *Introduction à la modélisation géométrique*. Site Web: <http://vrlab.epfl.ch/~thalmann> (juillet 2005).
- [Tryfona et al., 1999] Tryfona N., Jensen C. *Conceptual data modeling for spatiotemporal applications*. GeoInformatica, Vol. 3, 1999. pp. 245-268.
- [Tsai, 1986] Tsai R. *An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision*. Proceedings of IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986.
- [Tzonis et al., 1986] Tzonis A., Lefaivre L. *Classical Architecture - The poetics of Order*. MIT Press, Cambridge 1986.
- [Ungers, 1994] Ungers O. M. *Ordo, pondo et mensura: criteri architettonici del Rinascimento*. Dans Rinascimento. Da Brunelleschi a Michelangelo. La rappresentazione dell'architettura. Catalogue de l'exposition. Venise, 1994.
- [Vallée, 1853] Vallée L. L. *Spécimen de coupe de pierres, contenant les principes généraux du trait et leur application aux murs, aux plate-bande. Aux berceaux, aux voûtes spheriques, aux voûtes de révolution, aux voûtes à base polygonale*. Paris, 1853.
- [Véron et al., 1998] Véron P., Léon JC. *Shape preserving polyhedral simplification with bounded error*. Computer & Graphics Vol. 22(5), 1998. pp. 565-585.
- [Visnovcova et al., 2000] Visnovcova J., Gruen A., Zhang L. *Image-Based Object Reconstruction and Visualization for inventory of cultural heritage*. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Verarbeitung, Modellierung und Auswertung von 3D-Daten, Berlin 2001
- [Waldhäusl, 1994] Waldhäusl P., Brunner M. *3x3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXX Part B5, pp. 436 - 429.
- [Wang et al., 1994] Wang A., Jepson A-D. *A new closed-form solution for absolute orientation*. Proceedings of CVPR, 1994. pp.129-134.
- [Weinbrenner, 1819] Weinbrenner F. *Architektonisches Lehrbuch*. Tübingen, 1819.
- [Werner et al., 2002] T. Werner, A. Zisserman, *New technique for automated architectural reconstruction from photographs*. Proc. 7th Europe Conference on Computer Vision. Vol. 2, 2002. pp. 541-555.
- [Wittkover, 1968] Wittkover R. *Il balustro rinascimentale e il Palladio*. Bollettino del Centro Internazionale di Studi di Architettura Andrea Palladio. Numéro X. Vicenza, 1968.
- [Wittkover, 1998] Wittkower R. *Architectural principles in the age of humanism*. John Wiley & Sons, 1998.

Table des illustrations

<i>Figure 1.</i> Schéma représentant les trois techniques de restitution photogrammétrique.....	16
<i>Figure 2.</i> Illustration schématique des deux principes de fonctionnement des dispositifs de balayage laser	17
<i>Figure 3.</i> Le relevé de la cour du Midi du château Comtal à Carcassonne.....	19
<i>Figure 4.</i> Consolidation du nuage de points de la chapelle de la Vieille Charité à Marseille.....	22
<i>Figure 5.</i> Deux types de représentation géométrique du même objet.....	24
<i>Figure 6.</i> La restitution d'un décor sculpté par maillage automatique.....	25
<i>Figure 7.</i> Le diagramme de Voronoï et la triangulation de Delaunay.....	26
<i>Figure 8.</i> Maquette 3D de la façade sur jardin de l'Hôtel de Sully à Paris.	27
<i>Figure 9.</i> Fonctions de modélisation par balayage.....	28
<i>Figure 10.</i> Fonction de modélisation par interpolation.....	29
<i>Figure 11.</i> Photo-modélisation des Ecuries du directeur, Saline Royal d'Arc et Senans.....	30
<i>Figure 12.</i> L'extraction et le plaquage des textures sur la maquette 3D	33
<i>Figure 13.</i> Le processus de construction d'une texture avec relief	35
<i>Figure 14.</i> Synthèse des procédures pour l'acquisition, le traitement et le rendu de données spatiales.....	37
<i>Figure 15.</i> Temple néoclassique à l'intérieur de la « Mole Vanvitelliana », Ancône, Italie.....	41
<i>Figure 16.</i> Le relevé de la Cathédrale de Ancône, Italie.....	41
<i>Figure 17.</i> Modèle 3D de la « Confraternita della Misericordia » à Savignano, Italie.....	42
<i>Figure 18.</i> Modèle 3D du Palais Royal de Turin, Italie	43
<i>Figure 19.</i> Relevé de la porte latérale gauche de Al-Khasnesh, Jordanie.....	44
<i>Figure 20.</i> À gauche, le principe de l'acquisition des données par le capteur laser et la caméra HD	45
<i>Figure 21.</i> Acquisition laser panoramique dans un quartier de Venise	46
<i>Figure 22.</i> Relevé et restitution de l'église de Saint Georges en Ethiopie	47
<i>Figure 23.</i> Restitution de l'abbaye de Pomposa, Italie	48
<i>Figure 24.</i> Relevé de l'acropole de Monte Polizzo	50
<i>Figure 25.</i> Schéma général de l'approche hybride de restitution tridimensionnelle proposée	53
<i>Figure 26.</i> Stratégie d'acquisition des données	62
<i>Figure 27.</i> Schéma de l'acquisition des blocs de photographies.....	62
<i>Figure 28.</i> Le modèle de caméra de Tsai.....	65
<i>Figure 29.</i> L'orientation d'une photographie sur le nuage de points.....	66
<i>Figure 30.</i> Orientation de 3 blocs d'images sur le nuage de points.....	67
<i>Figure 31.</i> Extraction de coordonnées additionnelles à partir d'un couple d'images	69
<i>Figure 32.</i> Extraction de profils par la manipulation d'un plan en intersection avec le nuage de points	70
<i>Figure 33.</i> Séquence d'opération de la procédure de rectification d'image.....	72
<i>Figure 34.</i> Le réseau de noeuds développé pour la rectification d'image en temps réel	73
<i>Figure 35.</i> L'extraction de profils sur un support mixte (plan d'intersection/rectification).....	74
<i>Figure 36.</i> Reconstruction d'une surface dominante	79
<i>Figure 38.</i> Reconstruction par plans de construction.....	80
<i>Figure 37.</i> La reconstruction d'une transition de la forme	80
<i>Figure 39.</i> Éléments moulurés dans un module de l'édifice examiné	81
<i>Figure 40.</i> Deux planches de traités d'Architecture	84

Figure 41. Classification des moulures de l'architecture classique proposée par Rattner	85
Figure 42. Schéma illustrant les rôles des moulures dans la composition d'un édifice classique	86
Figure 43. Construction de l'ordre composite	87
Figure 44. Atomes géométriques pour la construction des moulures de l'architecture classique	89
Figure 45. Schéma des relations d'attributs du noeud «Atome géométrique»	90
Figure 46. Schéma de la connexion d'attributs entre deux noeuds «Atome géométrique»	91
Figure 47. Construction d'une moulure par combinaison d'atomes géométriques.	92
Figure 48. Un profil vertical et deux horizontaux construit par combinaison d'atomes géométriques.	92
Figure 49. Fonctions de génération des surfaces formalisées	93
Figure 50. Planche décrivant un chapiteau d'ordre dorique	95
Figure 51. Description géométrique d'un chapiteau dorique à partir du traité de Palladio	95
Figure 52. Description sémantique d'un chapiteau dorique à partir du traité de Palladio	96
Figure 53. Première étape d'instanciation de la primitive	97
Figure 54. Deuxième étape de l'instanciation de la primitive	98
Figure 55. Troisième étape d'instanciation de la primitive	99
Figure 56. La primitive instanciée dans le nuage de points	99
Figure 57. La modélisation de la déclaration d'une séquence d'atomes géométriques	100
Figure 58. Six balustres modélisées par déclaration	101
Figure 59. Trois bases à doucine modélisées par déclaration de moulures	102
Figure 60. La structure de données pour la description géométrique et paramétrique d'une primitive	103
Figure 61. Schéma des relations entre la base de données et le modèleur 3D	104
Figure 62. Génération de la carte de profondeur	107
Figure 63. Définition de la maille de déformation de la surface en fonction d'un niveau de résolution	107
Figure 64. Reconstruction tridimensionnelle d'un bas-relief à partir d'une carte de profondeur	108
Figure 65. Les relations morceau-tout dans un chapiteau d'ordre corinthien	113
Figure 66. Relations membre-collection dans une classification de bases	114
Figure 67. Relations composant-assemblage dans un modèle théorique de théâtre romain	115
Figure 68. Ambiguïtés entre le vocabulaire de l'architecte et les divisions physiques des éléments réalisés ..	115
Figure 69. Découpages morphologiques de l'objet élaborés en fonction de deux analyses différentes	116
Figure 70. Union et division de surfaces	117
Figure 71. Graphe de description sémantique de l'édifice	118
Figure 72. Représentations multiples organisées autour d'une entité morphologique	120
Figure 73. Segmentation du nuage de points en fonction d'un découpage morphologique	121
Figure 74. Carte de profondeur calculée sur le nuage de points	122
Figure 75. Coloration du nuage de points d'un élément de décor à partir d'une photographie orientée	123
Figure 76. Extraction automatique et manuelle de profils significatifs	124
Figure 77. Abaque d'informations dimensionnelles relatives à un élément architectural	125
Figure 78. Extraction et plaquage des textures à partir de photographies orientées	127
Figure 79. Tableau comparatif des représentations géométriques étudiées	128
Figure 80. Synthèse de types de représentations géométriques traitées	129
Figure 81. Structure de dossiers créés par l'application pour gérer des projets de restitution	133
Figure 82. L'architecture du système proposé	144
Figure 83. Schéma de la base de données du système de consultation	145
Figure 84. Schéma du fonctionnement de l'outil pour la prise de mesure sur le nuage de points	146
Figure 85. Schéma du fonctionnement de l'outil pour l'extraction des profils du nuage de points	147
Figure 86. Schéma du fonctionnement de l'outil pour la recherche du point de vue d'une photographie	148
Figure 87. Quatre «points de vue» sur l'objet étudié élaboré partir de la même décomposition	149
Figure 88. Schéma du fonctionnement de l'outil de nomenclature par thesaurus	151
Figure 89. Schéma du fonctionnement de l'outil pour le choix d'une représentation géométrique	151

Figure 90. Ensemble des informations hétérogènes associées à une entité morphologique	152
Figure 91. Recherche d'informations à partir d'un point d'observation	154
Figure 92. Deux captures d'écran du système ARKIS	158
Figure 93. Formalisation des relations de composition pour l'étude du pronaos d'un temple	159
Figure 94. Des modèles théoriques instanciés sur le relevé des vestiges du théâtre romain d'Arles	160
Figure 95. Restitution de deux états d'évolution de la cour de la Sorbonne	161
Figure 96. Comparaison d'hypothèses de restitution de l'évolution du Château Comtal à Carcassonne	162

ANNEXE A

NUBES forma

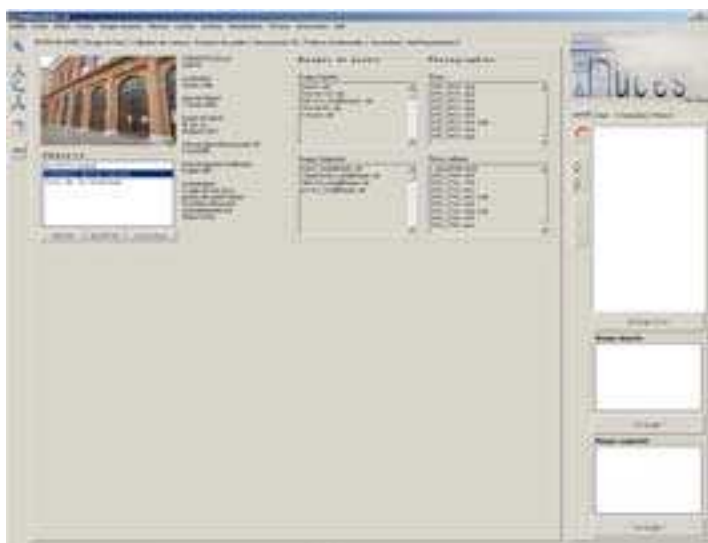
Outil de reconstruction 3D d'édifices

Captures d'écran et commentaires

Ouverture d'un projet

Le premier onglet de l'interface de l'outil concerne la gestion des projets.

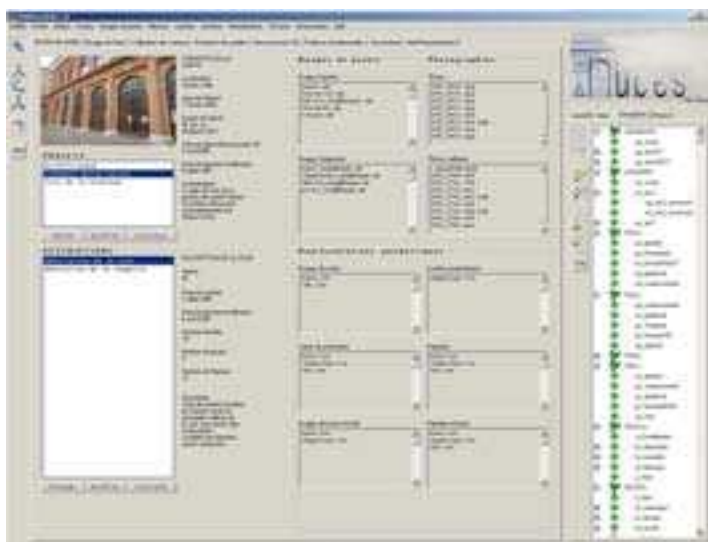
Sur la partie gauche de l'écran l'utilisateur peut sélectionner un projet dans une liste ou en créer un nouveau. Les quatre listes au centre de l'écran montrent les fichiers des nuages de points (importés ou segmentés) et les photographies (importées ou orientées) relatives au projet sélectionné.



Sélection d'une description

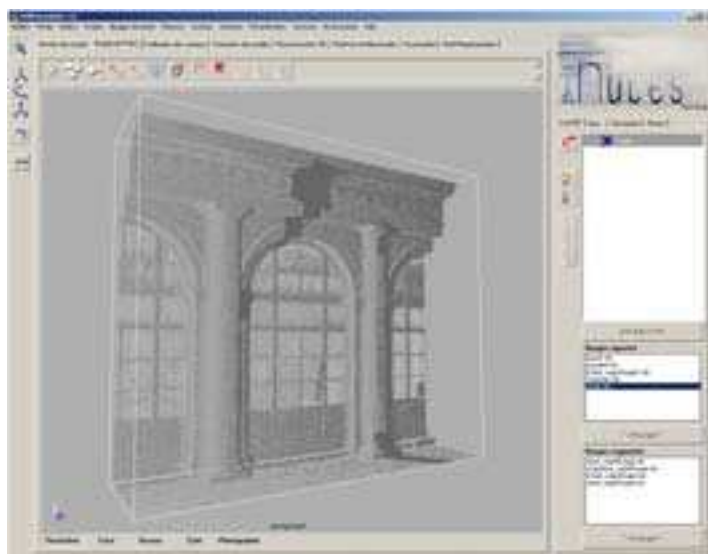
Une fois le projet sélectionné, l'utilisateur peut choisir dans la liste (en bas sur la gauche) une description sémantique.

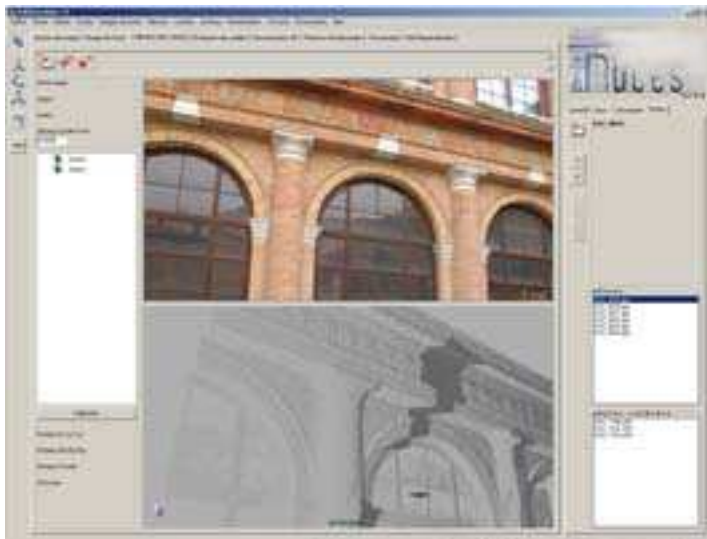
Les 6 listes en bas à droite montrent les représentations géométriques déjà élaborées relatives aux éléments de la description sémantique sélectionnée.



Importation d'un nuage de points

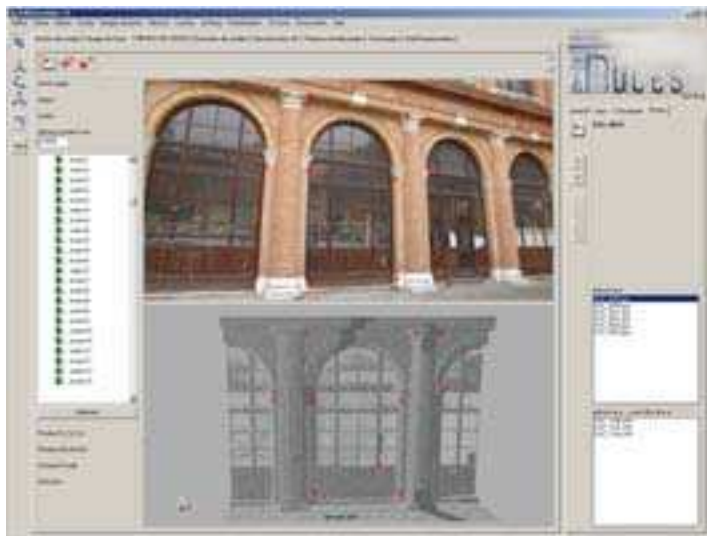
Le deuxième onglet de l'interface permet d'importer, de manipuler dans l'espace, et de segmenter des nuages de points issus d'un balayage laser. Les nuages peuvent être importés à partir d'un fichier ASCII en différentes modalités : simple, avec la valeur d'intensité de retour, ou avec les valeurs RVB (voir la section 4.2.1)





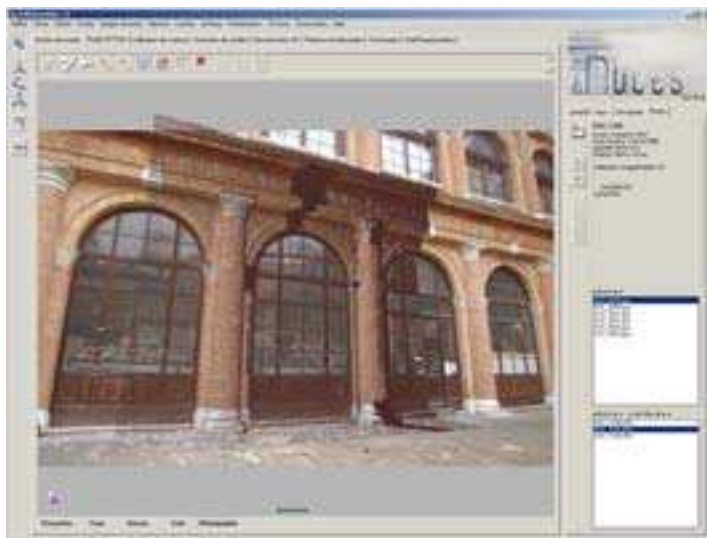
Consolidation hybride

Le troisième onglet de l'interface permet d'orienter des photographies sur un nuage de points. L'interface est divisée en trois parties, en haut, une fenêtre affiche la photographie sélectionnée dans la liste des photos importées. En bas, une fenêtre 3D permet de manipuler le nuage de points. Sur la gauche une liste montre les correspondances saisies respectivement sur la photos et sur le nuage.



Saisie des correspondances

Deux fonctions permettent de sélectionner des points 2D sur la photographie et 3D sur le nuage de points. Onze couples de coordonnées sont nécessaires pour effectuer le calcul de calibration de la caméra (section 4.2.2.1). Les résultats de ce calcul sont utilisés comme paramètres (position, orientation et distance focale) d'une caméra dans l'espace.



Superposition de la photo sur le nuage de points

La caméra calibrée et associée à la photographie orientée peut être appelée par un bouton positionné en bas de la fenêtre 3D. Ce bouton, affiche les éléments présents dans la scène 3D (nuages, courbes, polygones, etc.) au dessus de la photographie (plan d'image de la caméra sélectionnée dans la liste photographies orientées (sur la droite de l'écran).

Extraction des profils

Le quatrième onglet de l'interface permet l'extraction de profils d'un nuage de points.

La fenêtre en bas permet de visualiser et manipuler un plan d'intersection dans l'espace. La fenêtre en haut visualise en temps réel les profils isolés du nuage de points et sert de support pour la restitution bidimensionnelle.

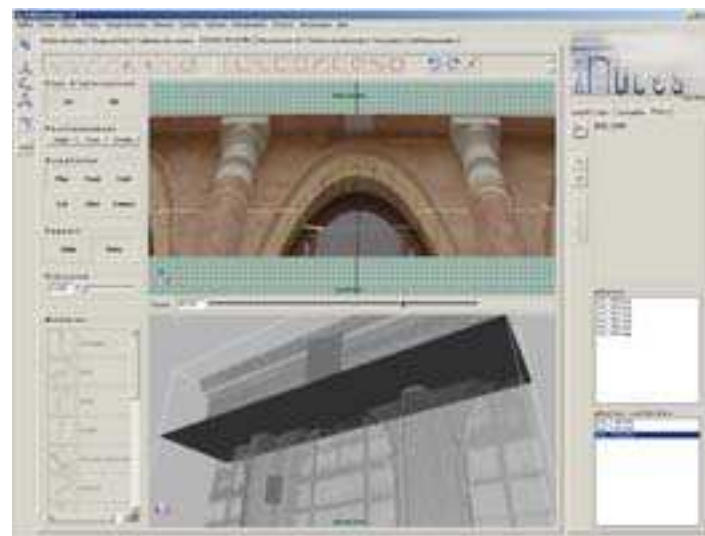
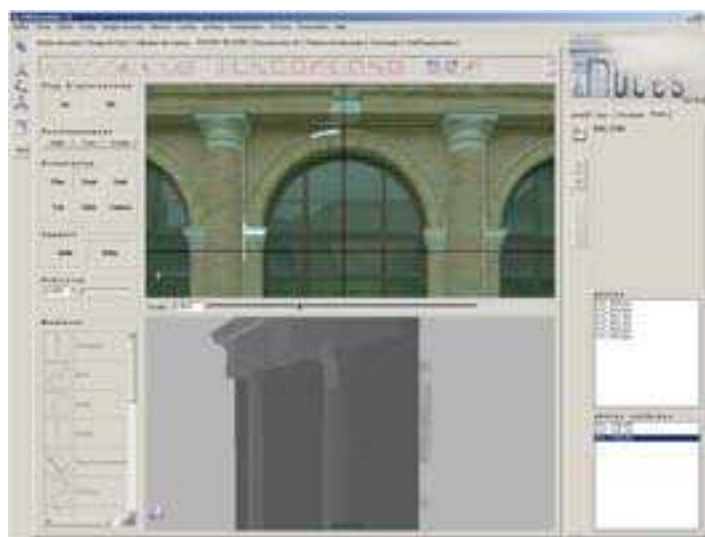
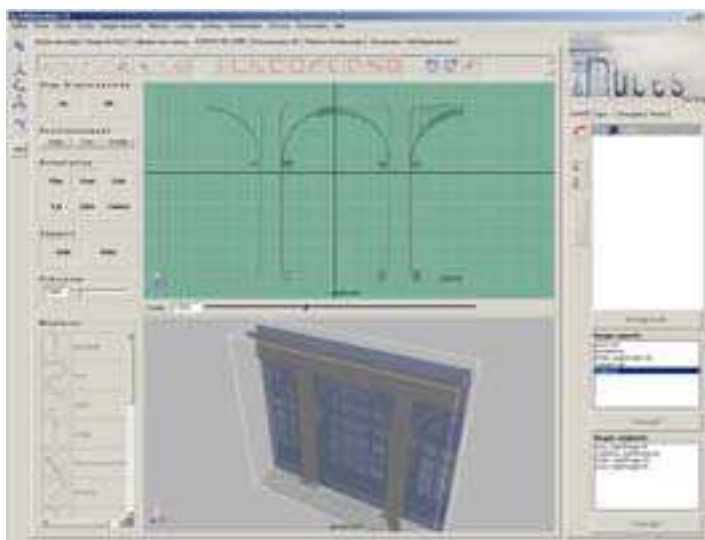
Les profils peuvent être restitués dans l'espace en fonction de l'orientation de ce plan.

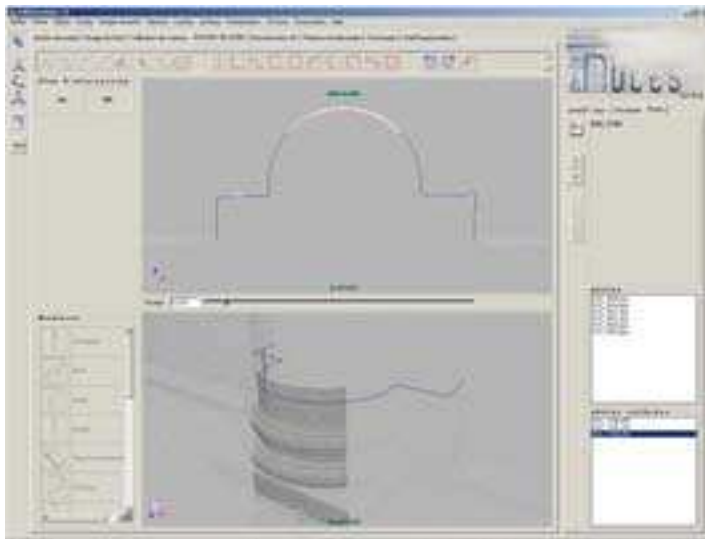
L'utilisateur peut définir l'orientation du plan en sélectionnant trois points du nuage de points, en fonction des axes principaux de la scène 3D, ou manuellement.

Le support mixte (intersection/rectification)

Le plan d'intersection peut être enrichi par une photographie rectifiée en temps réel en fonction des positions et orientations relatives d'une caméra orientée sur le nuage de points et du plan d'intersection.

L'utilisateur sélectionne une photographie dans la liste (sur la droite de l'écran). Un curseur (entre les deux fenêtres) permet de déplacer le plan d'intersection sur sa normale en provoquant la mise à jour de la rectification (section 4.3.3).



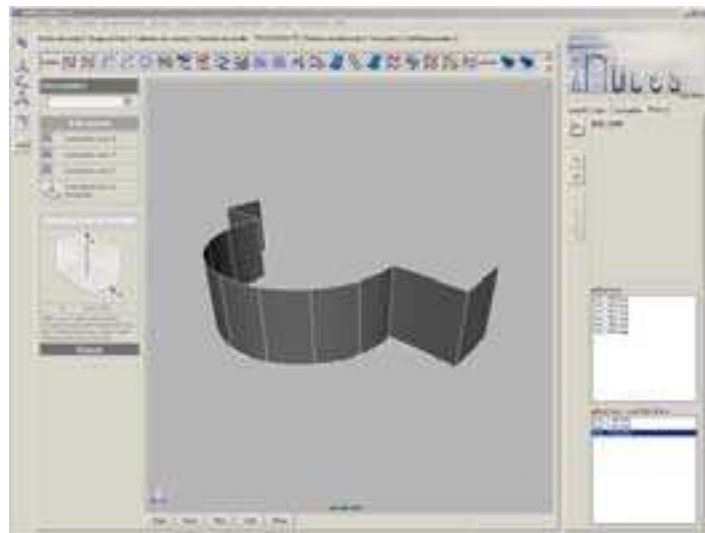


Reconstruction des profils

Le plan en intersection avec le nuage de points, sert de support pour la reconstruction des profils. Pour cette phase, l'utilisateur peut utiliser trois types d'outils :

la reconstruction des profils génériques par des courbes B-splines de 1° ou 3° degré ;

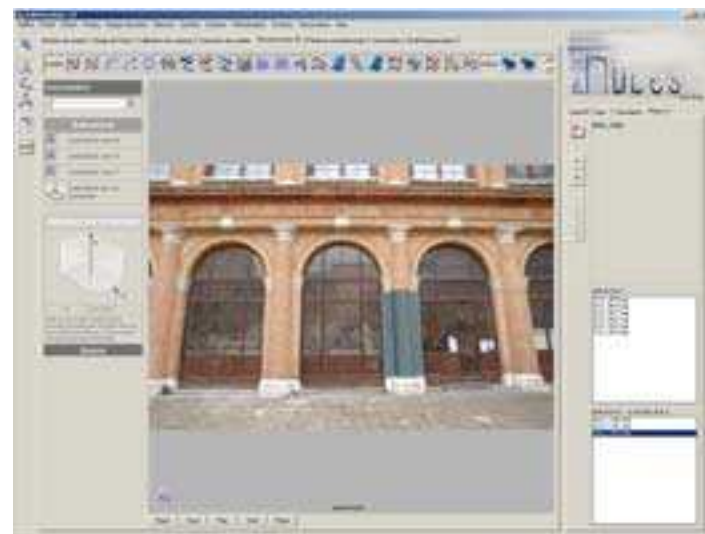
la reconstruction des moulures par combinaison d'atomes géométriques ;



la reconstruction des profils par combinaison de moulures (en bas sur la gauche) stockées dans une base de données distante.

Reconstruction des surfaces

Cette phase utilise les fonctions de modélisation canoniques pour la génération des surfaces à partir des profils reconstruits. Une fenêtre (sur la gauche) organise un ensemble de procédures optimisées pour la reconstruction des éléments architecturaux.



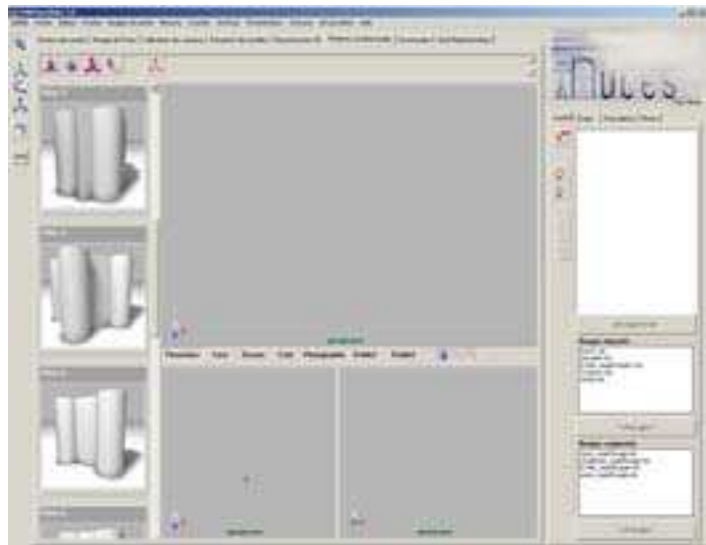
Reconstruction des éléments s'appuyant sur les photographies.

Toutes les opérations pour la reconstruction des surfaces peuvent être conduites sur des vues canoniques (plan, face, dessus, perspective) ainsi que directement sur les photographies orientées sur le nuage de points. Les images constituent le support visuel pour l'interprétation de la forme des éléments.

Bibliothèque de primitives architecturales

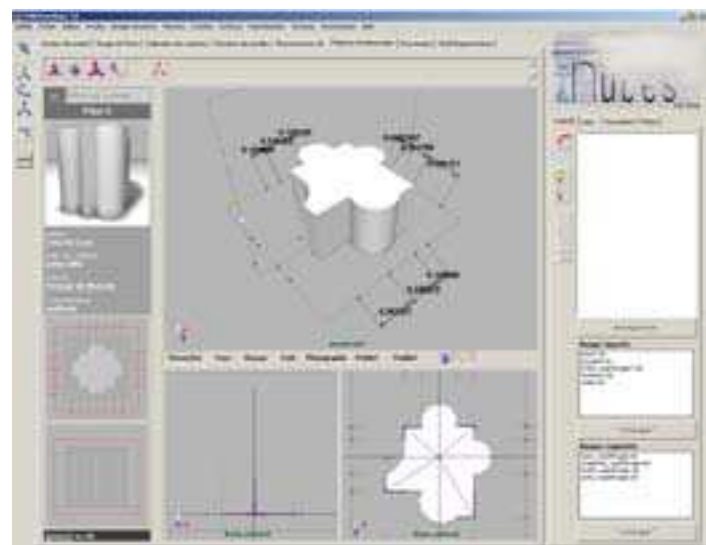
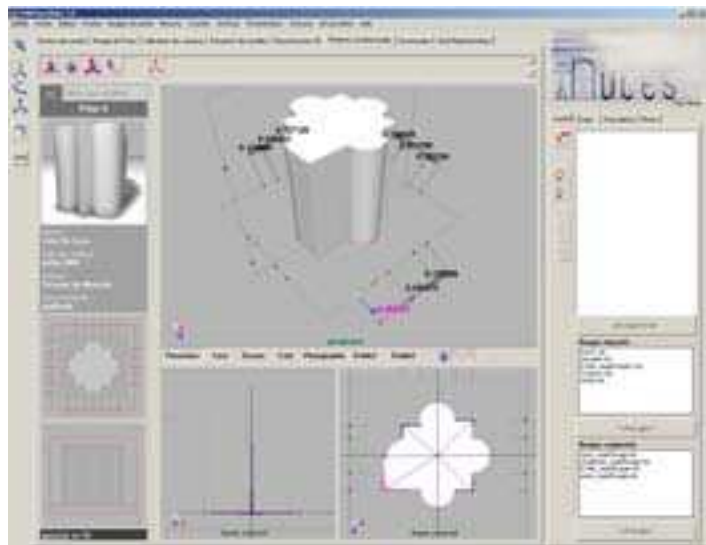
Au delà des fonctions de reconstruction à partir des profils, l'utilisateur peut utiliser une bibliothèque de primitives architecturales paramétrées. Ces primitives sont stockées et organisées en catégories dans une base de données sur Internet.

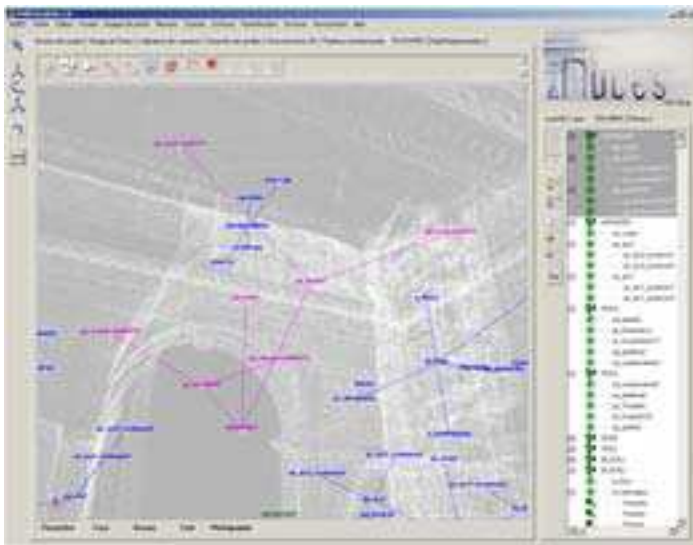
Une fois sélectionnée une primitive dans la page PHP (sur la gauche), l'élément est généré dans la scène 3D par un script MEL envoyé au modeleur depuis la base de données.



Déformation des primitives téléchargées

Le script de génération 3D des primitives contient à la fois les procédures pour leur description géométrique mais aussi l'historique de construction de l'élément sous forme d'un réseau de nœuds dynamiques. Ceci permet de déformer la primitive dans ses dimensions globales, dans ses profils caractéristiques, dans les atomes qui composent ses profils et enfin dans les simples points de contrôle des courbes. La primitive est représentée en trois vues distinctes : perspective (en haut) et deux plans d'intersection sur les profils principaux de l'élément. Ces plans peuvent être utilisés comme support pour le positionnement de la primitive sur le nuage de points. Les mesures des parties de l'élément sont mises à jour au cours de la déformation.



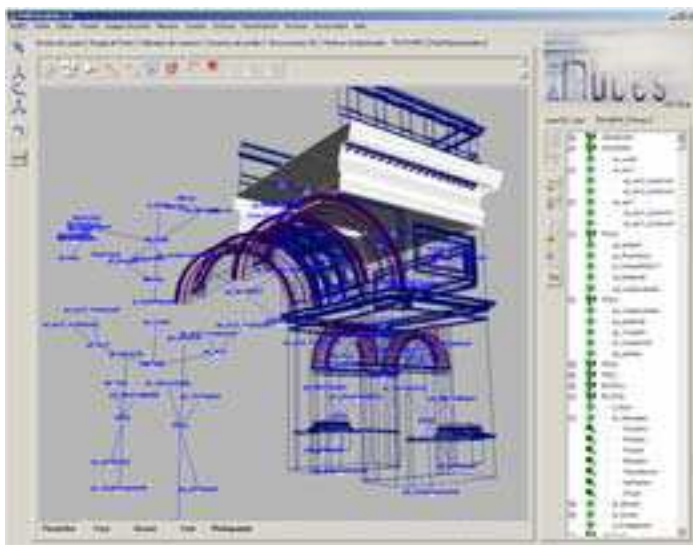
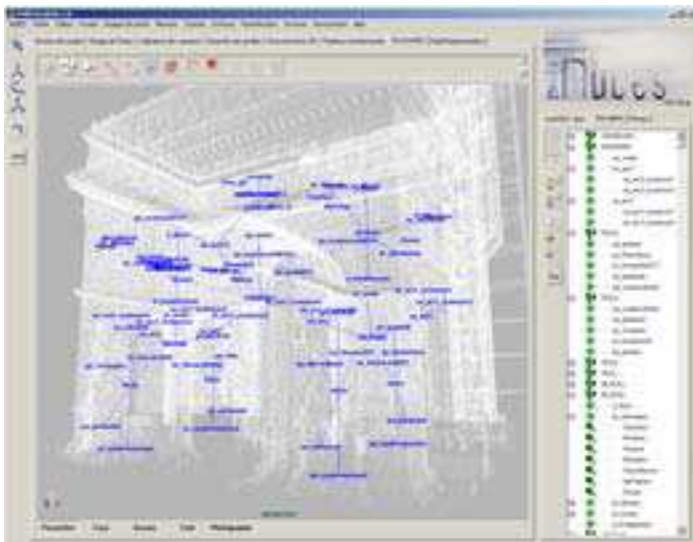


Construction d'un graphe de description sémantique

Cette phase consiste à construire un graphe de description sur un nuage de points ou sur la maquette de l'édifice.

L'utilisateur peut composer le graphe à l'aide de trois éléments : les entités morphologiques, les groupes finalisés et les repères. Ces éléments peuvent être positionnés librement dans l'espace ou centrés automatiquement au barycentre d'un objet sélectionné. Les relations hiérarchiques entre les éléments du graphe peuvent être établies dans la fenêtre 3D ou dans la liste (sur la droite). Les noms, ainsi que les liaisons hiérarchiques entre les éléments peuvent être modifiés directement dans cette liste.

À chaque modification de l'arbre de description dans la liste correspond une mise à jour du graphe dans la fenêtre 3D. L'utilisateur peut construire plusieurs description du même édifice et les enregistrer, les ouvrir ou les exporter vers la base de données du système de consultation (voir annexe B).



Décomposition morphologique de la maquette de l'édifice.

Une fois la phase de description terminée, l'utilisateur peut associer des surfaces reconstruites à partir du nuage de points aux entités morphologiques du graphe.

Cette phase permet de générer et organiser des multiples représentations (basées sur les points, sur les courbes et sur les polygones) autour des entités morphologiques isolées dans le graphe de description.

Segmentation du nuage de points (en haut).

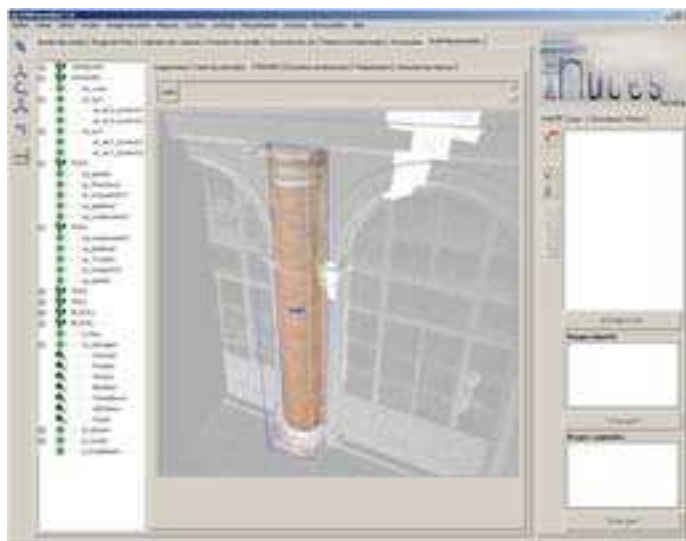
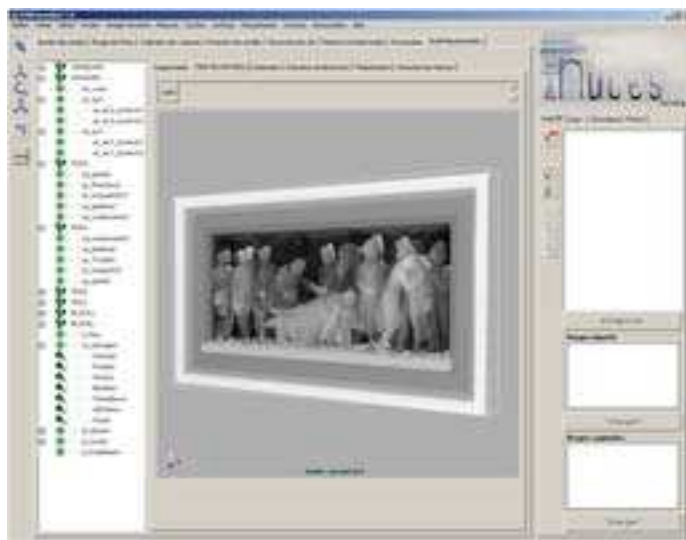
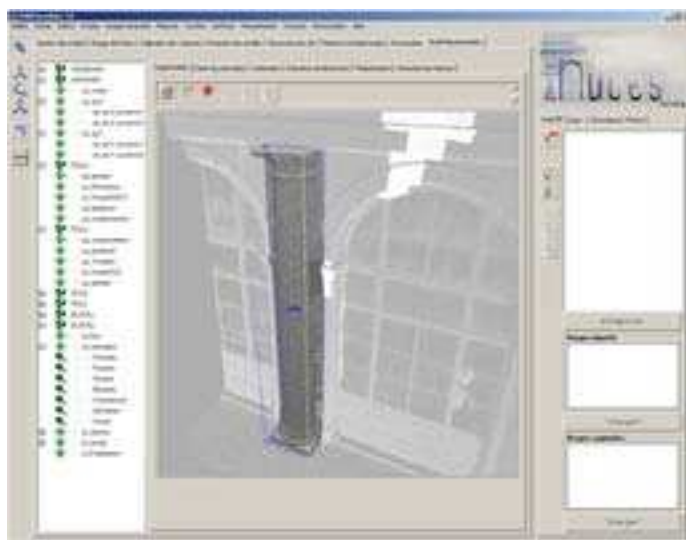
Ce type de représentation utilise uniquement le nuage de points acquis par balayage laser. Celui-ci est segmenté en fonction de l'enveloppe englobant une entité morphologique du graphe. Cette enveloppe peut être définie manuellement sur le nuage de points ou déduite automatiquement de l'extension spatiale de la géométrie associée à une entité morphologique.

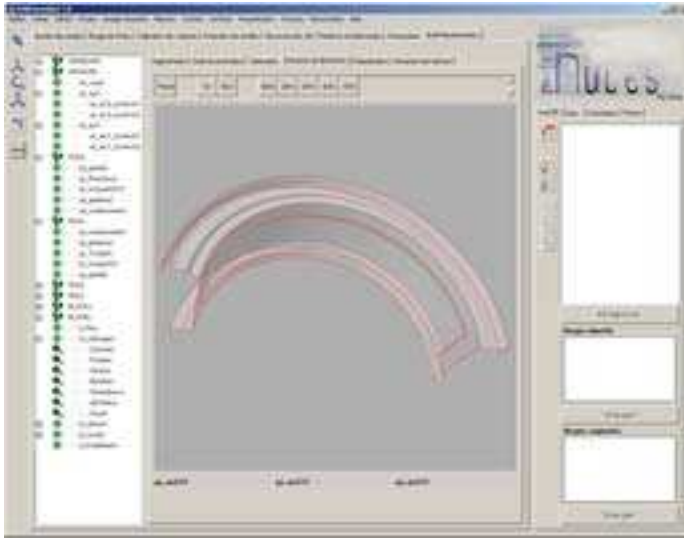
Cartes de profondeur (au centre)

Ce type de représentation peut être élaborée à partir d'un nuage de points segmenté. L'utilisateur définit l'orientation d'un plan pour la génération de la carte de profondeur qui est calculée en fonction de la distance de chaque point du nuage du plan.

Coloration d'un nuage de points (en bas)

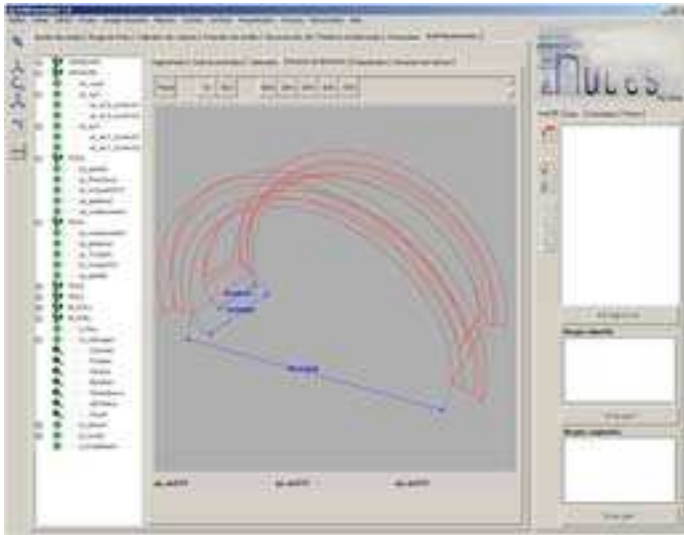
Ce type de représentation utilise un nuage de points segmenté et une photographie orientée. En exploitant la superposition image/nuage, la procédure colore les points du nuage en fonction des valeurs RVB extraites de la photographie.





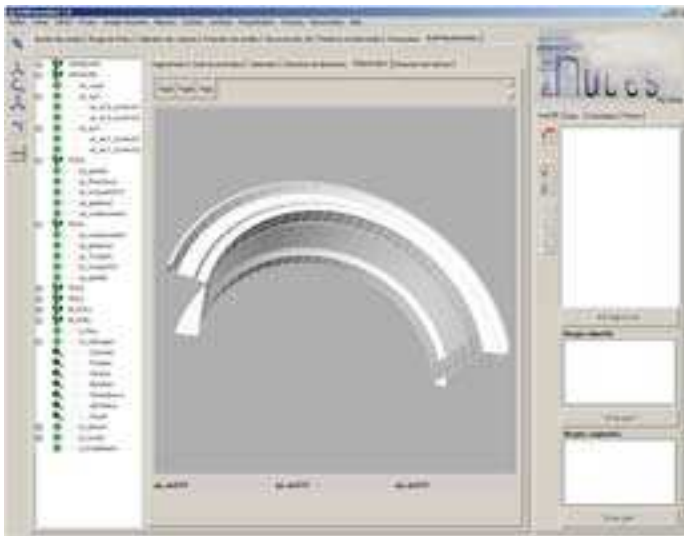
Profils caractéristiques

Ce type de représentation peut être composé par les profils extraits d'un nuage de points ou reconstruits de façon semi-automatique à partir d'une surface reconstruite. Dans ce dernier cas, l'utilisateur peut extraire les contours de l'élément ou des profils spécifiques sur les surfaces. À cette phase s'associe l'extraction d'informations dimensionnelles : les mesures des parties de la forme représentée peuvent être organisées et qualifiées par un label.



Polygonisation des surfaces

Ce type de représentation peut être élaboré à partir de la géométrie reconstruite d'un élément. En fonction de trois niveaux de résolution préétablis (haut, moyen, bas) ou de valeurs arbitraires, une procédure convertie les surfaces NURBS en une représentation polygonale quadrangulaire.



Plaquage des textures à partir des photographies

Ce type de représentation utilise une représentation polygonale comme support pour le plaquage des textures. Les textures sont extraites automatiquement à partir d'une photographie orientée. Les textures associées à la géométrie peuvent être re-échantillonnées en différents niveaux de résolution.

ANNEXE B

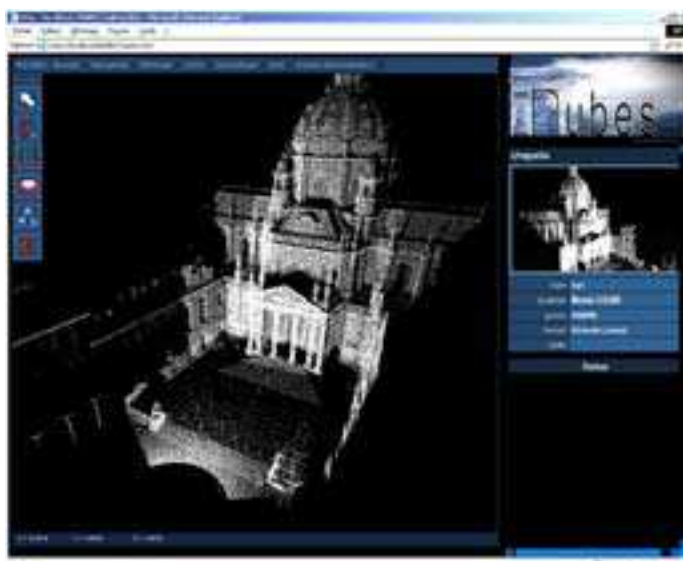
NUBES visum

Système de consultation sur Internet des relevés et des représentations de l'édifice
Captures d'écran et commentaires

Ouverture d'un projet

L'utilisateur sélectionne un projet dans la base de données (sur la droite).

En fonction du projet choisi, une liste de nuage de points disponibles est affichée. Les nuages choisis sont ensuite téléchargés en local et affichés dans la scène 3D (sur la gauche).

**Prise de mesure interactive**

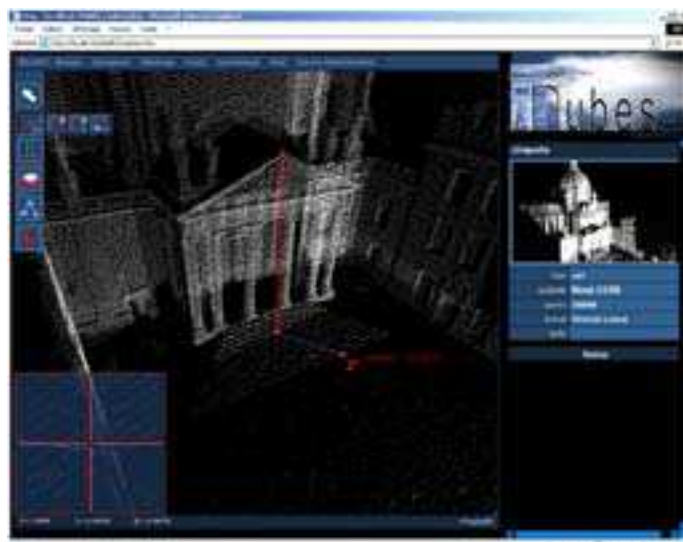
Trois outils permettent la prise de mesure interactive.

La distance simple : il s'agit de la distance entre deux points sélectionnés dans le nuage de points.

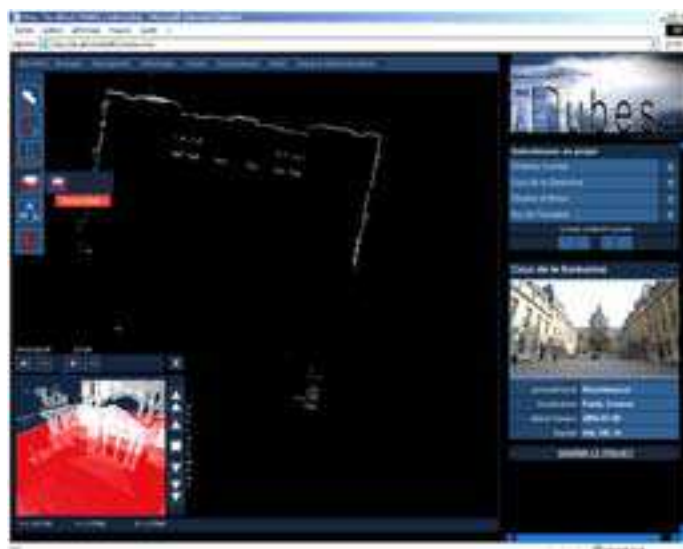
La mesure à la plomb : il s'agit de la hauteur (axe vertical) entre deux points.

La distance à niveau : il s'agit de la distance sur l'axe horizontale entre deux points.

Toutes les mesures extraites peuvent être enregistrées dans la base de données à l'intérieur d'un espace dédié à chaque utilisateur. Pour chaque mesure on stocke le nom, les coordonnées des points sélectionnés et un texte de commentaire.

**Extraction de profils**

L'extraction de profils peut être conduite à partir de la sélection de trois orientations principales. Les orientations sont relatives à la boîte englobant le nuage de points sélectionné. Un outil (en cours de développement) permet d'orienter le plan d'intersection de façon interactive.





Chargement d'une description sémantique

La base de données stocke les descriptions sémantiques développées avec NUBES forma. Ces descriptions peuvent être reproduites à l'intérieur de la scène 3D. Pour chaque description, les éléments du graphe, (entités morphologiques, groupes finalisés et repères) sont représentés dans l'espace et les relations hiérarchiques exprimées par un segment. L'arbre de description est affiché sur la droite.



Gestion des hiérarchies

En sélectionnant un élément du graphe, une procédure analyse l'arbre des relations hiérarchiques et étend la sélection aux éléments fils. Une fois une entité sélectionnée, une fiche de description est appelée (sur la droite) à partir d'une requête dans la base de données. Cette fiche contient cinq blocs d'informations : nomenclature, qualification, représentation, sources et commentaires.



Nomenclature par thesaurus

En cliquant sur l'icone nomenclature il est possible d'associer un terme de vocabulaire à l'élément sélectionné. Pour l'instant nous avons intégré à la base de données, le thesaurus officiel de la médiathèque du patrimoine. Ce type de qualification peut être exploités pour effectuer des recherches d'éléments par terme architectural.

Multi-représentations

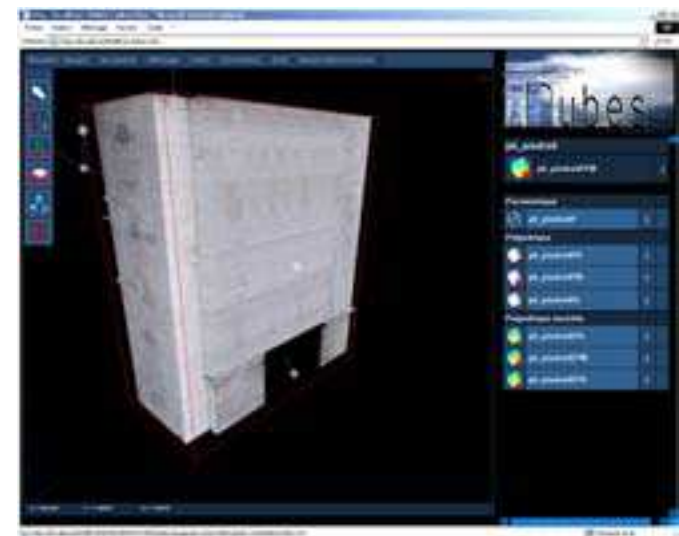
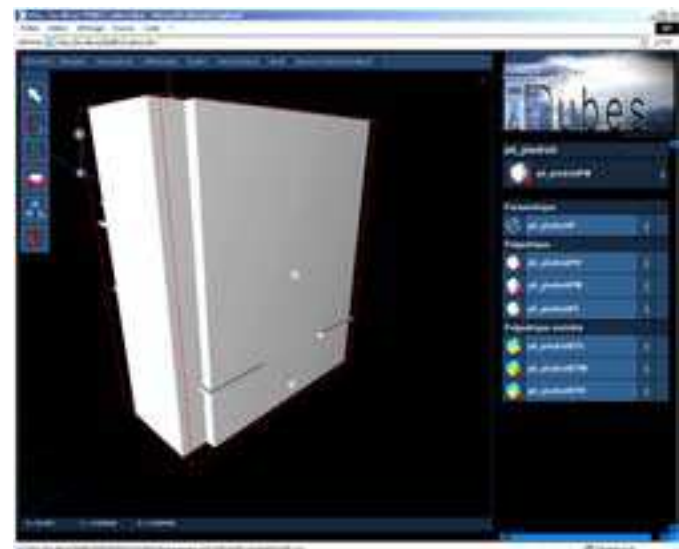
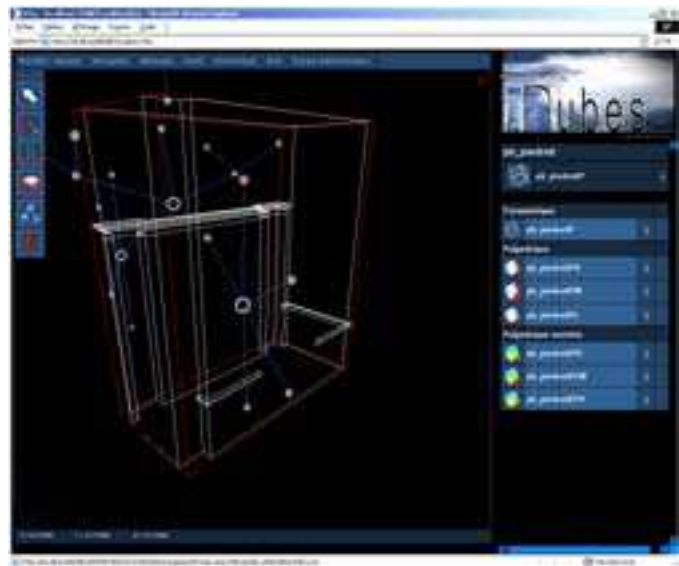
Le bloc représentation contient toutes les représentations enregistrées dans la base de données relatives à l'élément sélectionné. La liste des représentations est divisée par type : points, courbes, polyèdres. Pour chaque représentation un symbole indique le niveau de résolution (bas, moyen, haut).

On peut choisir une représentation dans la liste et la télécharger dans la scène 3D.

Dans la figure en haut, une représentation filaire est téléchargée. Cette représentation est stockée dans la base comme liste de points de contrôle de courbes B-splines.

L'image de centre montre une représentation polygonale. Pour cette représentation il est possible de télécharger différents niveaux de résolution en fonction des performances du système utilisé ou du type de consultation souhaitée.

L'image du bas montre une représentation polygonale enrichie par les textures extraites à partir des photographies. Dans ce cas, le niveau de résolution textures peut être choisi en fonction des exigences d'analyse.





Représentations basées sur les points

Dans cette image, l'entité représentant un groupe sculpté est associée à une représentation basée sur les points. Il s'agit d'un nuage de points coloré.



Cette image montre un nuage de points enrichi par les valeurs RVB relatives à une carte de profondeur. Pour ce type de représentation, un contrôle permet de varier la taille des points. Nous avons prévu la possibilité de contrôler ce paramètre dynamiquement en fonction de la position (distance) du point d'observation.



Recherche du point de vue d'une photographie.

Dans cette image, une photographie a été sélectionnée dans la liste des photos (sur la droite). Le point d'observation dans la scène 3D (caméra) est automatiquement positionné en fonction des paramètres d'orientation de l'appareil photo au moment de la prise de vue. Ces paramètres (calculés dans NUBES forma) sont enregistrés dans la base de données pour chaque photographie.

ANNEXE C

Terrains d'expérimentation
Images des travaux et observations

CAPITOLE DE DOUGGA
Tunisie

Équipe

L. De Luca,
M. Florenzano.

Période

2001/2002

Observations

Premier essai
des techniques de
photomodélisation. Le
relevé a été conduit
par une acquisition
photographique avec un
appareil photo numérique
de 5 millions de pixels.

Les blocs d'images ont
ensuite été calibrés pour
extraire des photographies
les coordonnées spatiales
des points caractéristiques
de l'objet.

Sur ces points, des
primitives géométriques
ont été instanciées.

Certains éléments du
monument (chapiteaux,
bases, colonnes, etc.)
ont dû être modélisés
préalablement avant d'être
instanciés à cause de leur
complexité géométrique.

Les photographies ont été
utilisées comme support
visuel pour la phase de
reconstruction et comme
source pour le plaquage
des textures.





PALAIS ROYAL
Paris

Équipe

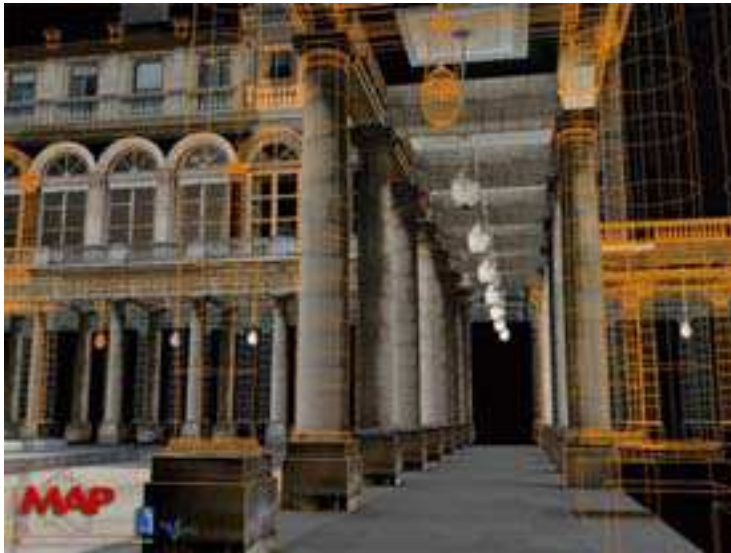
F. Gaspard, F. Dekeyser, L. De Luca, M. Florenzano, P. Leray et X. Chen.

Période

2002/2003

Observations

Premier essai d'acquisition par balayage laser 3D effectué en collaboration avec la société Mensi.



Développement d'une procédure pour la conversion des nuages de points en systèmes de particules dans le but de les exploiter dans notre environnement de modélisation.



Expérimentations sur l'intégration de représentations multiples : structures filaires, nuages de points, polygones texturés.

UNITE D'HABITATION
Marseille

Équipe

*Encadrement : L. De Luca
Étudiants : O. Carrano, N.
Champroux, C. Curchod, F.
Rollandin, T-W. Son,
C. Veyrat.*

Période

2002/2003

Observations

*Les acquisitions
photographiques ont
été menées par blocs
isolés (école maternelle,
cheminées, piscine,
gymnase, etc.).*

*Les différents blocs
modélisés ont été intégrés
sur un plan de référence
à l'intérieur d'une image
panoramique du contexte
urbain.*

*La maquette résultante
a servi pour valider les
performances du moteur
d'affichage 3D en temps
réel.*





PALAZZO MATTEI DI GIOVE

Rome

Équipe

*L. De Luca, M. Florenzano
L. Sacchi, L. Milan.*

Période

2002/2003

Observations

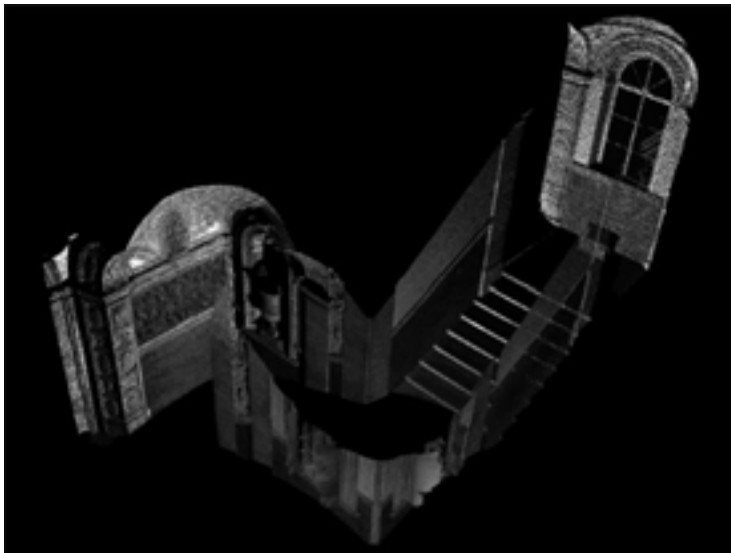
Expérimentation d'une acquisition conjointe systématique (nuage de points à plusieurs niveaux de détail et photographies numériques à 6 millions de pixels).

Comparaison des solutions commerciales de maillage automatique de surfaces sur un échantillon représentatif de l'édifice. Premières expériences d'extraction de profils pertinents pour la restitution de la forme à partir de procédures classiques de modélisation géométrique.

Premières expériences sur l'instanciation de primitives paramétriques (NURBS avec historique de construction) dans le nuage de points.

Développement d'une procédure en langage MEL pour le plaquage des textures à partir d'une projection perspective.

Essai de structuration de la maquette : chaque élément architectural, a été enregistré comme fichier indépendant dans un dossier contenant les textures associées.



**CHAPELLE DE LA
VIEILLE CHARITE
Marseille**

Équipe

Encadrement :

L. De Luca,

Étudiants : M. Chaillou, O.

Kadi, Y-Z Lee, M. Zammel,

G. El-Baaklini, M. Roche,

S. Ragoug,

K-T. Kim.

Période

2003/2004

Observations

*Relevé complet de la
morphologie de l'édifice :*

8 stations à l'extérieur

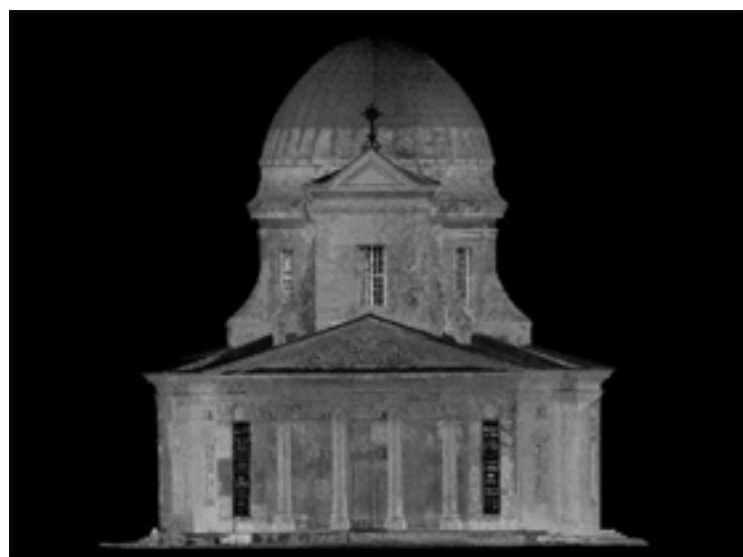
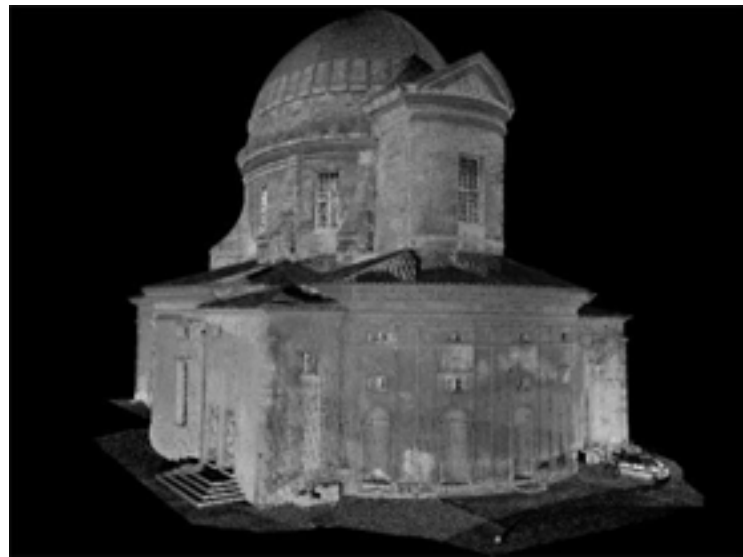
*et 6 à l'intérieur de la
chapelle.*

*Consolidation extérieur /
intérieur.*

*Développement d'un outil
en langage MEL pour
l'extraction des profils
pertinents.*

*Développement d'un outil
en Virtools DEV pour la
manipulation 3D du nuage
de points.*

*Développement de la
procédure de conversion
pour afficher les valeurs
d'intensité de retour du
scanner dans l'outil de
manipulation 3D.*





THEATRE ANTIQUE
Arles

Équipe

*J-Y. Blaise, F. De
Domenico, L. De Luca,
I. Dudek.*

Période

2002/2004

Observations

*Utilisation de la
photomodélisation pour
la reconstruction des
fragments conservés sur le
site.*



*Premières expériences
d'instanciation de modèles
théoriques d'éléments typés
(bases et chapiteaux) sur
la géométrie des fragments
relevés.*

*Première intégration d'une
scène 3D à l'intérieur
d'une application «client-
serveur».*

*Formalisation complète
des relations partie-
ensemble par la définition
d'un modèle de description
du bâtiment de scène.*



HÔTEL DE SULLY
Paris

Équipe

M. Berthelot, M.
Florenzano, R. Saleri, L.
De Luca, F. De Domenico
et K-T. Kim.

Période
2004

Observations

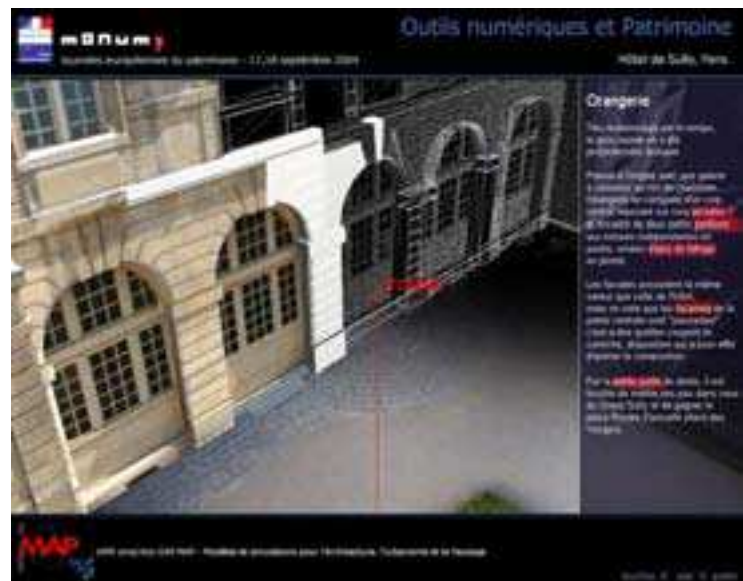
Première utilisation
systématique d'un
hélicoptère radio-
commandé pour la prise de
photos aériennes à basse
altitude.

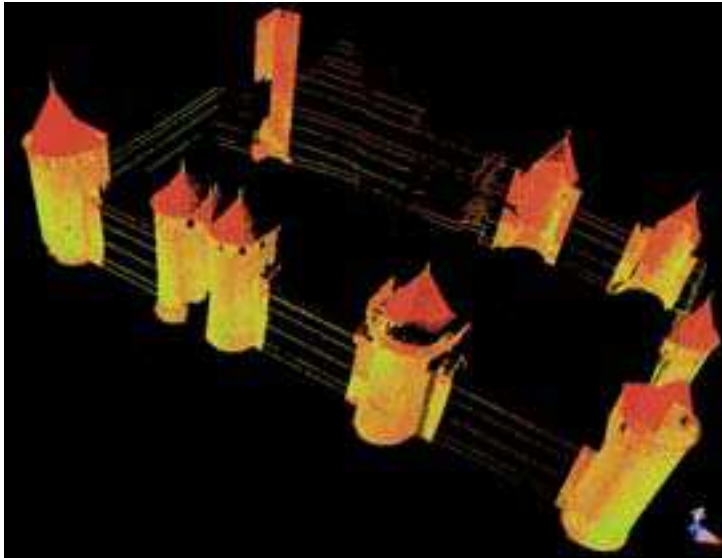
Développement
informatique de l'outil
d'orientation des
photographies aériennes
sur le nuage de points issus
du balayage laser terrestre.

Implémentation d'une
procédure pour la
colorisation du nuage
de points à partir d'une
photographie orientée.

Premiers développements
pour un outil de mesure
sur le nuage de points dans
une scène 3D-temps réel
sur Internet.

Implémentation d'une
procédure pour l'appel de
fiches descriptives stockées
dans une base de données,
en fonction d'un point
d'observation dans la
scène 3D.





CHÂTEAU COMTAL
Carcassonne

Équipe

*M. Berthelot, R-M. Cano,
M. Chaillou, L. De Luca,
T. Driscu, C-W. Busayarat.*

Période

2005/2006

Observations

*Relevé complet du château
par 26 stations et pour
un total de 31.000.000 de
coordonnées environ.*



*Premières expériences de
segmentation du nuage de
points en fonction d'une
description sémantique.*

*Reconstruction 3D
complètement assistée
par les méthodes, les
techniques et les outils
développés.*

*Premières observations sur
l'intégration d'hypothèses
de restitution au relevé de
l'état actuel de l'édifice.*



FRISE DE L'ARC DE TRIOMPHE
Paris

Équipe

*L. De Luca, M. Berthelot,
M. Delhomme, N. Deliens.*

Période
2005

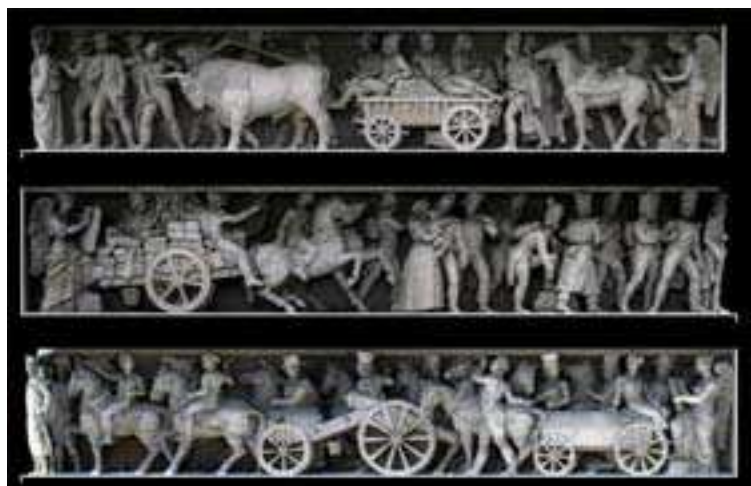
Observations

Acquisition complète par balayage laser 3D de 135 mètres linéaires de frise à partir d'une distance de 90 mètres.

Acquisition photographique de la frise à 45 mètres du sol à l'aide d'une nacelle.

Développement d'une procédure pour la génération de cartes de profondeur à partir du nuage de points.

Expériences sur la coloration du nuage de points en mélangeant les valeurs RVB extraites d'une photo avec celles d'une carte de profondeur.



ANNEXE D

Liste des publications

Publications dans des revues avec comité de lecture

L. De Luca, P. Véron, M. Florenzano

Reverse-engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach

Special issue on Shape Reasoning and Understanding

Computer&Graphics vol. 30, no.2. Elsevier, avril 2006

Publications dans des actes de congrès avec comité de lecture

L. De Luca, M. Florenzano, P. Véron

Modélisation sémantique et multi-représentation d'édifices

Virtual Retrospect 2005

Biarritz 8,9,10 novembre 2005

L. De Luca, M. Florenzano, P. Véron.

Semantic-based modelling and representation of patrimony buildings

SVE Worksp on towards Semantic Virtual Environments

Villars, Switzerland, 2005

J-Y. Blaise, F. De Domenico, L. De Luca, I. Dudek

Architectural Modelling and Information Interfacing : Learning from Three Case Studies

ITI 2004 : 26th International Conference on Information Technology Interfaces

Cavtat / Dubrovnik, 2004

J-Y. Blaise, F. De Domenico, L. De Luca, I. Dudek

Acquisition de données vs gestion de connaissances patrimoniales : le cas des vestiges du théâtre antique d'Arles

EGC 2004 - 4èmes journées d'Extraction et de Gestion des Connaissances

Clermont Ferrand, 2004

F. Dekeyser, F. Gaspard, L. De Luca, M. Florenzano, X. Chen, P. Leray

Cultural heritage recording with laser Scanning, computer vision and exploitation of Architectural rules

ISPRS WG V/4 and IC WG III/V : International Workshop on vision techniques for digital architectural and archaeological archives

Ancona, 2003