



U.F.R. STMIA
(Sciences et Techniques Mathématiques, Informatique, Automatique)

Ecole Doctorale IAE+M Lorraine
(Informatique, Automatique, Électronique - Électrotechnique, Mathématiques)

Département de Formation Doctorale en Informatique

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de

L'UNIVERSITE DE NANCY I HENRI POINCARÉ

Spécialité : Sciences de l'architecture

par

Emmanuel ALBY

ÉLABORATION D'UNE METHODOLOGIE DE RELEVÉ D'OBJETS ARCHITECTURAUX

Contribution basée sur la combinaison de techniques d'acquisition

Soutenue le 23 novembre 2006 devant le jury composé de

Claude TRAUNECKER	Professeur des Universités	Président du jury Rapporteur
François GUENA	Professeur des Ecoles d'architecture	Rapporteur
Philippe EVEN	Professeur des Universités	Examineur
Jean-Pierre PERRIN	Professeur des Ecoles d'architecture	Codirecteur de thèse
Pierre GRUSSENMEYER	Professeur des Universités	Directeur de thèse

CRAI : Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, ENSA de Nancy

PAGE : Photogrammétrie Architecturale et GEomatique, INSA de Strasbourg

Résumé

Le relevé extérieur d'ouvrage architectural est le moyen de créer une représentation du bâtiment dans son état de conservation. Deux techniques d'acquisition à distance se distinguent par leur efficacité et la qualité des données produites : la photogrammétrie et le balayage optique. Ces deux techniques sont soumises aux règles de l'optique et ne permettent pas de mesurer les parties invisibles de l'objet. La combinaison des techniques peut améliorer la qualité des données, mais il subsiste toujours des zones non mesurées et de ce fait non représentables. Pour palier ce problème, nous émettons l'hypothèse que l'usage de connaissances architecturales peut permettre de recomposer les parties manquantes lors de la modélisation. Cette thèse propose un processus basé sur la combinaison de ces deux techniques et sur l'intégration des connaissances architecturales accessibles depuis la documentation écrite ou encore par les règles de construction des édifices. La complexité d'un ouvrage architectural et la multitude des données imposent une division de la modélisation en plusieurs étapes identifiables. Nous proposons de découper le processus de modélisation selon le mode de figuration des niveaux de détail utilisé pour la représentation de l'architecture. Les niveaux différents de détail permettent d'obtenir des étapes de modélisation clairement identifiables, mais aussi un processus progressif où les informations peuvent être utilisées au fur et à mesure. Notre approche intègre ainsi les données dimensionnelles à la documentation architecturale, pour permettre la mise en place d'un processus de modélisation afin d'obtenir un modèle le plus complet possible.

Mots-clés : Patrimoine architectural, méthodologie de relevé, photogrammétrie, scanner laser, combinaison d'outils d'acquisition.

**Development of a methodology of architectural objects survey:
contribution based on the combination of acquisition techniques.**

Abstract:

The external survey of an architectural work is a way to create a representation of the building in its conservation condition. Two techniques of remote acquisition differ by their effectiveness and the quality of the produced data: photogrammetry and laser scanning. These two techniques depend on optical principles: what cannot be seen cannot be measured. The combination of these techniques can improve the data quality, but unmeasured zones always remain, therefore cannot be represented. In order to solve this problem, we put forward the hypothesis that using architectural knowledge may allow to rebuild these zones during the modeling process. This study suggests a modeling process based on the combination of these two techniques and on the integration of the available architectural knowledge, from paper documentation or from the built works construction rules. An architectural work being complex and the data numerous, a division of the modeling process in several distinct stages appears necessary. We suggest dividing modeling process according to different figuration of level of details frequently used to represent architecture, and define a process using information in a progressive way. Thus our approach consists in integrating dimensional data into architectural documentation, in order to develop a modeling process providing a model as complete as possible.

Keywords: Architectural heritage, surveying methodology, close range photogrammetry, Laser scanner, acquisition tools combination.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier mes directeur et codirecteur Pierre GRUSSENMEYER et Jean-Pierre PERRIN. Le premier pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et avoir joué de sa grande ouverture d'esprit et m'avoir intégré dans les projets du laboratoire. Le second pour ses conseils précieux et pour avoir veillé au bon déroulement de cette période.

Ensuite viennent les remerciements adressés aux vérificateurs qui ont contribué pour une grande part à l'état orthographique, grammatical et syntaxique de cet ouvrage. Pour tous les accords, pluriels et oublis en tout genre, pour les suggestions de liaisons et d'autres encore. Mais aussi merci à Élise pour m'avoir succédé au poste de standardiste du labo. Merci à Djéhanne pour avoir dû fêter son pot de départ pour Evreux. Merci à Fabienne d'y être venue. Merci à Benoît et Anne pour avoir montré qu'il était possible de rendre intelligible la partie 3.

Le lieu où se déroulent les recherches a toute son importance. Merci au labo, surtout merci à Sam pour l'ambiance et les contingences matérielles et Bernard pour les discussions informatiques. Merci à la machine à café et davantage à ceux qui la fréquentent.

Durant cette période de recherche s'est mise en place une collaboration à laquelle je dois beaucoup. Je tiens à remercier Nathalie de Montréal pour la modélisation sans dimension de 9h30 à 15h30.

Sommaire :

Le sommaire global de cet ouvrage va être présenté de forme synthétique dans un premier temps pour donner un aperçu global de sa structure. En effet, les chapitres ont été référencés dans le détail pour permettre une recherche rapide dans le document. A chaque début de partie, un sommaire relatif à celle-ci sera proposé dans sa totalité.

0.	Introduction générale	13
0.1.	Objectifs de l'étude	14
0.1.1.	Combinaison de techniques d'acquisition	14
0.1.2.	Connaissances architecturales	14
0.1.3.	Modélisation tridimensionnelle	15
0.2.	Questionnements	15
0.3.	Expérimentations	15
0.4.	Déroulement de la thèse	15
0.5.	Proposition	17
1.	Première partie : problématique, déroulement et contexte de l'étude	19
1.1.	Sujet et problématique	21
1.1.1.	Appropriation et critique du sujet original	21
1.1.2.	Mise en place de la problématique	26
1.2.	Déroulement de la période de recherche	32
1.2.1.	Intégration au sein du laboratoire d'accueil	32
1.2.2.	Maîtrise des outils et manipulation des données produites	33
1.2.3.	Projets	34
1.2.4.	Enseignement	38
1.3.	Contexte : documentation du patrimoine et acquisition de données 3D	40
1.3.1.	Patrimoine et monuments	40
1.3.2.	Conservation et restauration du patrimoine architectural	44
1.3.3.	Organisme de protection du patrimoine	48
1.3.4.	Organismes d'acquisitions de données 3D, documentation :	50
1.3.5.	Patrimoine et acquisition 3D, conclusion	52
1.4.	Conclusion de la première partie	54
2.	Deuxième partie : les techniques d'acquisition 3D	55
2.1.	Photogrammétrie	59
2.1.1.	Historique de la photogrammétrie	59
2.1.2.	Géométrie projective sur photographies	61
2.1.3.	Stéréophotogrammétrie	61
2.1.4.	Photogrammétrie numérique	68
2.1.5.	Photogrammétrie architecturale	71
2.1.6.	Evolutions de la photogrammétrie	75
2.2.	Balayage laser	79
2.2.1.	Fonctionnement	79
2.2.2.	Nuage de points	84
2.2.3.	Post-traitement	85
2.2.4.	Synthèse relative au balayage optique	91
2.3.	Autres Techniques	93
2.3.1.	Laser ligne	93
2.3.2.	Lumière structurée	93
2.4.	Comparaison entre laser et photogrammétrie	95
2.4.1.	Principe	95

2.4.2.	Matériel	99
2.4.3.	Processus	100
2.4.4.	Données	104
2.4.5.	Synthèse du comparatif	106
2.5.	Conclusion sur les techniques d'acquisition	107
2.5.1.	Complémentarité :	107
2.5.2.	Le nuage de points comme convergence des types de données de sortie	108
3.	Troisième partie : modélisation d'ouvrage architectural	109
3.1.	Documentation d'ouvrage architectural	113
3.1.1.	Documentation	113
3.1.2.	Ouvrage architectural	115
3.1.3.	Informations et données relatives aux ouvrages bâtis	117
3.2.	Représentation du bâti	120
3.2.1.	Perception visuelle comme moyen de globalisation	120
3.2.2.	Communication d'un modèle tridimensionnel	121
3.2.3.	Exploitation d'une représentation	122
3.3.	Modélisation d'ouvrage	126
3.3.1.	Définition	126
3.3.2.	Document ou modèle ?	130
3.4.	Préambule à l'élaboration d'un principe de modélisation architecturale	136
3.4.1.	Types de modélisation	136
3.4.2.	Caractéristiques du modèle	139
3.4.3.	Gestion de la complexité et de la complication	141
3.4.4.	Gestion de la documentation	142
3.5.	Conclusion sur la modélisation d'ouvrage architectural :	143
4.	Quatrième partie : proposition d'outils et méthodes de modélisation d'objets architecturaux	145
4.1.	Analogie entre conception architecturale et relevé d'ouvrage	149
4.1.1.	Ouvrage bâti comme résultat de la conception architecturale	149
4.1.2.	Le relevé comme processus	152
4.1.3.	Définition et dimensionnement du modèle	154
4.1.4.	Du général au détail	161
4.1.5.	Expérimentation de la méthode analogique	169
4.2.	Traduction numérique des connaissances architecturales	170
4.2.1.	Caractère abstrait de la connaissance	170
4.2.2.	Différentes représentations	172
4.3.	Outils d'aide à la modélisation d'ouvrage bâti	181
4.3.1.	Trois concepts essentiels	181
4.3.2.	Deux publics visés	183
4.3.3.	La base de données comme lieu de regroupement des connaissances	183
4.3.4.	Mise en place d'un outil de gestion du relevé architectural	186
4.3.5.	Définition puis dimensionnement : expérimentation	192
4.3.6.	Aspect fonctionnel	198
4.4.	Outils spécifiques aux étapes	203
4.4.1.	Forme de base	203

4.4.2.	Divisions du volume _____	204
4.4.3.	Insertions _____	207
4.4.4.	Mise en relations _____	209
4.4.5.	Détail _____	210
4.5.	Conclusion sur la proposition de modélisation d'ouvrage _____	215
5.	Cinquième Partie : synthèse et prospections _____	217
5.1.	Combinaisons _____	219
5.1.1.	Regroupement des techniques d'acquisition _____	219
5.1.2.	La modélisation guidée par les connaissances architecturales _____	226
5.2.	Prospections _____	231
5.2.1.	Implémentation d'outils _____	231
5.2.2.	Possibilité de création d'outil pour l'utilisateur _____	236
5.3.	Conclusion _____	239
6.	Conclusion générale _____	241
6.1.	Combinaison de techniques _____	242
6.2.	Combinaison de documentations _____	243
6.2.1.	Connaissances architecturales _____	243
6.2.2.	Modélisation _____	243
6.3.	Contributions à la recherche _____	246
6.3.1.	Transversalité _____	246
6.3.2.	Complémentarité _____	246
6.3.3.	Essai de transmission de connaissances _____	247
6.4.	Extension de la problématique _____	247
7.	Bibliographie _____	249
	Annexe A : Projets au PAGE _____	263
	Annexe B : Présentation de l'Interface _____	285
	Annexe C : Adaptation du processus au projet des Pontonniers _____	291
	Annexe D : Liste des publications _____	301

0. Introduction générale

La notion de patrimoine est récente. Celle-ci occupe une place dans notre société de plus en plus prépondérante. Aujourd'hui, ce terme de « patrimoine » recouvre des champs aussi divers que des bâtiments, des œuvres d'art ou encore des paysages. Cependant, le terme de « patrimoine » renvoyait à l'origine à un patrimoine bâti, aux monuments historiques, c'est-à-dire à un bâtiment. Puis, le champ de cette notion s'est élargi.

La mise en valeur du patrimoine architectural passe par une prise de conscience de la nécessité de le protéger. C'est la mission d'organismes internationaux, tels que l'Unesco et l'ICOMOS. Il est, ainsi, essentiel de connaître ces ouvrages protégés dans leurs moindres détails pour les sauvegarder. Cette connaissance est indissociable des représentations du patrimoine bâti puisqu'elles sont le point de départ nécessaire de toute volonté de sauvegarde et de mise en valeur.

0.1. Objectifs de l'étude

Cette étude doit permettre la mise en place d'un protocole de relevé sur le terrain à l'aide des techniques de mesures adaptées et performantes et d'une mise en forme de ce relevé en fonction des modes de représentations actuels. La combinaison des techniques d'acquisition peut être complétée par l'ajout de connaissances liées aux ouvrages pour faciliter la prise en compte des mesures, d'une part, et pour formuler des hypothèses quant à la représentation d'éléments non mesurables, d'autre part.

0.1.1. Combinaison de techniques d'acquisition

C'est dans cet esprit qu'une technique d'acquisition moderne a été inventée à la naissance de la photographie : la photogrammétrie. Les critères pour son développement étaient la mesure à distance de bâtiments et l'enregistrement de l'état. Aujourd'hui, le balayage optique se positionne à côté de la photogrammétrie pour, parmi d'autres applications, permettre un relevé efficace à distance d'ouvrages bâtis. À l'heure actuelle, ces deux techniques sont concurrentes, c'est-à-dire que chacune peut permettre d'établir le relevé d'un ouvrage donné. La distinction que l'on fait dans leur fonctionnement implique une différence dans le relevé produit. Toutes deux ne fournissent pas de données complètes vis-à-vis de l'ouvrage. Cette distinction permet d'imaginer qu'une utilisation conjointe rendrait possible un enrichissement accru du jeu de données résultant.

0.1.2. Connaissances architecturales

Les domaines touchés par le relevé architectural à base de techniques d'acquisition concernent, dans un premier temps, les procédés de mesure en eux-mêmes. Ensuite, il est important de considérer l'objet dont il est question : un bâtiment. Le domaine de l'architecture regroupe un grand nombre d'activités et génère une grande quantité de connaissances, et ce, en s'étendant considérablement dans l'histoire. Les connaissances architecturales se trouvent sur différents supports, comme, par exemple, sur papier pour les plans ou les croquis et en divers matériaux pour les maquettes et les bâtiments. Elles prennent, également, différentes formes. Ainsi, les représentations d'ouvrages peuvent être concrétisées par des projections orthogonales ou perspectives. La diversité des documents liés à l'architecture pose un problème quant à une nécessité d'usage de ces connaissances. On peut déjà

s'interroger sur la combinaison des informations qui peuvent être intégrées entre elles, que leur support soit écrit, dessiné, modelé ou modélisé. Avec l'avènement de l'informatique, pris à l'échelle de ces informations pour certaines pluri-séculaires, il est possible d'envisager une intégration par les voies numériques.

0.1.3. Modélisation tridimensionnelle

La forme de représentation d'un relevé a évolué depuis le plan vers le modèle tridimensionnel numérique. Les plans sont utilisés comme extrait du modèle dont la fonction est de consigner le relevé sous la forme la plus représentative qu'est le modèle numérique. Cette migration est liée aux progrès de l'informatique mais aussi des techniques d'acquisitions.

0.2. Questionnements

Le relevé de bâtiment est un processus complexe, d'autant plus qu'il s'agit de combiner ici différents outils de mesure. L'assistance que représente l'intégration de connaissances architecturales nous paraît essentielle à première vue. Deux questions principales se posent. Comment la combinaison des techniques peut-elle être mise en place pour permettre d'apporter le plus d'informations dimensionnelles pour le relevé d'ouvrage ? Ensuite, nous nous interrogerons sur la piste principale de recherche. La considération des connaissances architecturales peut-elle faciliter cette combinaison ?

0.3. Expérimentations

Les projets d'expérimentation jalonnent l'étude et ce depuis son commencement. Tous n'ont pas les mêmes influences sur la recherche. En fonction de son avancement, leur rôle tient du questionnement, puis de la mise en œuvre de tests et enfin de la validation des hypothèses formulées par la recherche.

0.4. Déroulement de la thèse

Pour tenter d'apporter notre point de vue sur le problème soulevé par notre sujet, nous avons organisé notre thèse en cinq parties.

La première partie traite de l'analyse détaillée du sujet, des thématiques proches et connexes ainsi que des premières questions qui en découlent. Nous aborderons les thématiques de la maîtrise des outils d'acquisition et de la mesure en elle-même. Puis, nous nous intéresserons à la question de la consignation de données que constitue ainsi la formalisation du relevé. Viennent enfin les considérations liées à la documentation architecturale et à la modélisation tridimensionnelle. Les premières hypothèses de travail y sont consignées à la fin de cette première sous-partie. Ensuite, nous exposerons les éléments contextuels qui se divisent en deux ensembles : ceux liés à l'environnement et au déroulement de la recherche et ceux liés au contexte étendu de la recherche. Les relevés effectués seront également présentés.

Dans la seconde partie, nous aborderons la notion de mesure à travers l'exposé de la première technologie d'acquisition à distance que représente la photogrammétrie. Ensuite, nous poursuivrons notre recherche avec les connaissances liées au balayage optique. Ces deux procédés se démarquent de l'ensemble étendu de l'acquisition à distance que nous aborderons à travers les procédés proches mais non utilisables, ce qui renforcera les présupposés du sujet sur la combinaison. La complémentarité sera étudiée à l'aide d'un comparatif de ces deux techniques pour préparer ainsi les possibilités de combinaisons.

Dans la troisième partie, nous étudierons l'aspect lié à la modélisation architecturale. Nous présenterons les rapports qui existent entre les connaissances architecturales, la représentation d'ouvrage et le moyen de combinaison entre les deux que représente la modélisation. Celle-ci devient, ainsi, un moyen d'intégration de la documentation architecturale alors qu'elle est un objectif du point de vue du seul relevé. En fin de partie et au regard de la précédente, nous élaborerons un cahier des charges concernant les apports possibles de notre travail.

La quatrième partie constitue le centre de la recherche. Elle se place dans la continuité des deux précédentes qui ont défini les limites parmi les moyens existants possibles. La prise en compte des connaissances architecturales liées aux ouvrages bâtis pour établir la représentation du relevé à l'aide des techniques d'acquisition combinées nous permet de mettre en place un processus de relevé. Son application

informatique, via la modélisation, correspond à une méthode d'intégration des données issues des techniques d'acquisition et des connaissances architecturales.

En cinquième partie, nous reviendrons sur la proposition que constitue la partie centrale de notre recherche. Nous mettrons l'accent sur notre thèse et décrirons ce qu'il reste à faire pour que nos travaux permettent aux développements effectués de s'intégrer dans une progression.

0.5. Proposition

Les techniques d'acquisition apportent l'aspect dimensionnel à l'ensemble des connaissances liées à un ouvrage. La possibilité d'intégration d'une grande partie des informations ajoutées à ces données mesurées ouvre des perspectives menant à la complémentation du relevé d'ouvrage en palliant les manques révélés de données. De plus, la prise en compte de tout cet ensemble soulève une question supplémentaire que l'on associe cette fois à l'utilisateur. Elle concerne ses propres connaissances. Dans le milieu d'application de ce travail de recherche, le bagage de l'utilisateur peut prendre deux formes opposées. Dans un premier cas, il possède les connaissances liées aux appareils d'acquisition ; elles sont très pointues et correspondent à une spécialité : la topographie. Le deuxième cas envisageable est celui du porteur des connaissances architecturales, à savoir l'architecte. Dans ces deux cas, un déficit de connaissance est latent.

Notre proposition vise à réduire l'acquisition de connaissances pour l'un et l'autre domaine de connaissance en réalisant un pont entre les deux branches d'activités par le biais d'une méthode mise en application dans un environnement informatique permettant d'apporter une réponse au problème soulevé.

1. Première partie : problématique, déroulement et contexte de l'étude

Pour mettre en place ce travail de recherche, il convient d'analyser le sujet et de poser les premières questions qui en découlent. Dans un premier temps, nous étudierons notre sujet pour élaborer la problématique de travail et pour poser les premières hypothèses de recherche. Ensuite, nous aborderons le rapport que nous avons eu avec notre laboratoire d'accueil ainsi que ce que nous a apporté l'expérience pratique de l'enseignement pour illustrer l'importance et l'influence de la pratique au cours d'une longue période de recherche. Pour finir, nous essayerons de répondre à la question liée à l'aspect conjoncturel de l'étude qui peut se formuler ainsi : « Comment se positionne l'étude dans un contexte général ? ».

1.	Première partie : problématique, déroulement et contexte de l'étude	19
1.1.	Sujet et problématique	21
1.1.1.	Appropriation et critique du sujet original	21
1.1.1.1.	Maîtrise des techniques concernées	21
1.1.1.2.	Notions liées à l'acquisition de données	22
1.1.1.3.	Principe de combinaison	23
1.1.1.4.	Type d'ouvrages architecturaux	23
1.1.1.5.	Méthodologie	26
1.1.2.	Mise en place de la problématique	26
1.1.2.1.	Thématiques élémentaires	26
1.1.2.2.	Thématiques impliquées	27
1.1.2.3.	Questionnement	27
1.1.2.4.	Portée de la recherche	29
1.1.2.5.	Hypothèse	29
1.2.	Déroulement de la période de recherche	32
1.2.1.	Intégration au sein du laboratoire d'accueil	32
1.2.1.1.	Immersion	32
1.2.1.2.	Pratique	32
1.2.2.	Maîtrise des outils et manipulation des données produites	33
1.2.2.1.	Equipe	33
1.2.2.2.	Unité mixte de recherche 694	33
1.2.2.3.	Compétences	34
1.2.2.4.	Matériel	34
1.2.3.	Projets	34
1.2.3.1.	Initiation	35
1.2.3.2.	Questionnement et essais	36
1.2.3.3.	Expérimentation	37
1.2.3.4.	Expérience / Empirisme ?	37
1.2.4.	Enseignement	38
1.2.4.1.	Enseignement, recul et synthèse	38
1.2.4.2.	Relation entre recherche, enseignement et expérimentation	39
1.3.	Contexte : documentation du patrimoine et acquisition de données 3D	40
1.3.1.	Patrimoine et monuments	40
1.3.2.	Conservation et restauration du patrimoine architectural	44
1.3.3.	Organisme de protection du patrimoine	48
1.3.3.1.	UNESCO	48
1.3.3.2.	ICOMOS	49
1.3.4.	Organismes d'acquisitions de données 3D, documentation :	50
1.3.4.1.	ISPRS	51
1.3.4.2.	CIPA	52
1.3.5.	Patrimoine et acquisition 3D, conclusion	52
1.4.	Conclusion de la première partie	54

1.1. Sujet et problématique

Dans ce premier chapitre, il s'agira de présenter le sujet et les problématiques soulevées et ainsi de poser les premiers jalons d'une réflexion autour de notre sujet d'étude.

1.1.1. Appropriation et critique du sujet original

Le travail de recherche commence par l'analyse du sujet qui nous a mené à étoffer la problématique de départ. Ce sujet d'intitulé : « Elaboration d'une méthodologie de relevé d'objets architecturaux : Contribution basée sur la combinaison de techniques d'acquisition ». Ensuite, la critique du sujet reflète le travail réalisé et ouvre de nouvelles pistes.

1.1.1.1. Maîtrise des techniques concernées

L'acquisition à distance est le moyen de mesurer un objet sans contact avec celui-ci. Les techniques d'acquisition à distance, opérationnelles pour le relevé d'ouvrages bâtis, sont la photogrammétrie et le balayage laser¹. L'acquisition à distance, de par sa nature, permet de minimiser le temps de mesure sur le terrain en comparaison avec la mesure directe des mêmes données sur l'objet. De plus, elle rend possible la mesure de points inaccessibles. Le temps de travail le plus long se situe donc en laboratoire, pour la transformation des données brutes. La pratique de l'acquisition à distance déplace la plus grande part du temps de travail du terrain vers le laboratoire, d'une part, mais donne aussi les moyens de mesurer beaucoup plus d'éléments qu'avec les techniques traditionnelles².

La combinaison des techniques modernes d'acquisition à distance nous impose la connaissance de leurs principes de fonctionnement et la pratique des techniques les plus utilisées. Tout d'abord, il faut prendre conscience du fait que l'usage de techniques, telles que la photogrammétrie ou le balayage laser, peut difficilement se passer de l'usage des techniques topographiques traditionnelles. Notamment parce que les référentiels de mesure et de positionnement ont été créés à l'aide de ces techniques, le rattachement aux systèmes de coordonnées existant en dépend

¹ Cf. §2.1 et §2.2

² Outils classiques tels que mètre ruban, niveau etc.

donc : les normes suivent plus souvent les avancées technologiques qu'elles ne les précèdent.

1.1.1.2. Notions liées à l'acquisition de données

L'acquisition de données dimensionnelles est directement liée à la notion de mesure, mais aussi à celle de précision et d'erreurs qui en découlent. Que ce soit en photogrammétrie ou en balayage laser, le principe est de positionner un point dans les trois dimensions de l'espace, en repérant des points homologues sur plusieurs clichés pour la photogrammétrie ou en mesurant des distances et des angles pour le balayage laser.

Commençons par la définition des trois termes « mesure », « précision » et « erreur » pour saisir les relations qu'entretiennent ces notions et surtout ce qui les distingue. La mesure correspond à « ['] *évaluation d'une grandeur par comparaison avec une grandeur de même espèce prise comme référence (unité, étalon)* » [UNI04]. La mesure s'effectue à une précision donnée. La précision est vue comme la « *qualité d'un instrument de mesure donnant une valeur la plus proche possible de la grandeur mesurée* » [UNI04] ou encore comme la « *qualité qui exprime le degré d'erreur du résultat d'une mesure.* » [GDT05]. La valeur de la mesure étant différente de la grandeur mesurée, on doit aborder l'erreur qui est la « *différence algébrique entre le résultat du mesurage et la valeur de comparaison.* » [AFN94] ou plus précisément « ['] *Écarts entre valeurs théoriques réelles et mesures effectuées, dus :*
- à l'imperfection des instruments de mesure ; - aux lectures de l'opérateur ; - au milieu ambiant susceptible d'influencer les instruments de mesure ainsi que l'objet à mesurer. » [GDT93]

Ainsi, nous pouvons constater que la notion de mesure est directement liée à l'estimation de l'erreur si l'on veut en connaître la précision (inversement proportionnelle à l'erreur). Les deux principales techniques de mesures à distance que l'on va étudier et utiliser recouvrent différentes façons de mesurer la position de points et de gérer les erreurs. Par exemple, en photogrammétrie, le restituteur est la source principale d'erreur alors que pour le scanner optique c'est l'appareil qui génère l'erreur.

1.1.1.3. Principe de combinaison

Dans notre problématique, la nécessité de combinaison des différentes techniques d'acquisition résulte d'un constat d'échec : l'usage exclusif d'une technique n'apporte pas tous les résultats escomptés et ne permet pas l'usage de la connaissance liée à l'objet à mesurer. Ainsi, la combinaison de différentes techniques d'acquisition permet de pallier les défauts de l'une ou l'autre technique et d'obtenir, au final, des résultats plus fiables et plus complets.

La combinaison de plusieurs techniques d'acquisition apporte certains avantages *a priori*, puisqu'il est possible de profiter des particularités de chacune d'entre elles pour le même relevé. De plus, ce regroupement peut être générateur de moyens plus adaptés et de nouvelles méthodes de relevé architectural. La notion de combinaison, lorsqu'il s'agit de techniques ayant des objectifs similaires, induit logiquement le problème de redondance des données produites, ce qui provoque des traitements supplémentaires liés à la sélection et au filtrage des données.

Le terme « combinaison » soulève aussi la question de la compatibilité des données à fusionner et des systèmes d'acquisition. Pour tenter de combiner les techniques de relevé d'ouvrages architecturaux, il faudra s'être assuré de la possible complémentarité des différents types de données produites.

Il faut encore préciser que la notion de combinaison de techniques d'acquisition est un des volets de la collecte d'informations, appelée documentation, concernant un bâtiment. On peut considérer la combinaison d'informations dans un plus vaste champ de connaissances, ce qui peut permettre, par ailleurs, de simplifier l'acquisition.

1.1.1.4. Type d'ouvrages architecturaux

L'objet dont on doit faire le relevé n'est pas n'importe quel objet : il s'agit d'un bâtiment. Ce type d'objet est à différencier d'une parcelle rurale ou d'un objet quelconque, dont la forme est le fruit en grande partie de la contingence de la nature. Un bâtiment est le résultat de la pensée : il a été conçu, réfléchi, agencé. Un ouvrage bâti a été imaginé selon des principes précis et logiques, dont l'interprétation n'est certes pas accessible de façon automatique, mais peut être facilitée par la

connaissance des règles et méthodes de la conception et de l'édification architecturale. Les caractéristiques principales d'un ouvrage bâti en tant qu'un objet pensé sont ses grandes dimensions et sa grande complexité formelle.

Il est nécessaire d'apporter une précision quant au type de relevé d'ouvrage qui nous intéresse dans cette étude.

Il s'agit d'établir le relevé extérieur du bâtiment, car c'est celui-ci qui pose les problèmes que les techniques d'acquisition à distance tentent de résoudre. Il ne s'agit pas de négliger le relevé intérieur, mais d'utiliser les techniques d'acquisition dans la configuration où elles se révèlent indispensables : c'est-à-dire dans la mesure de l'inaccessible. De plus, le relevé extérieur a beaucoup plus de signification et contient plus d'informations sur la constitution, l'organisation, et l'agencement général de l'ouvrage que l'accumulation des plans d'intérieur, même si, bien entendu, les deux types d'informations sont étroitement liés.

Notre choix du type de bâtiment à relever est, d'une part, lié à la demande vis-à-vis de ce genre de pratique, mais aussi au besoin de notre travail. Il est évident que l'exemple doit être adéquat au problème auquel on veut répondre. Cependant, dans le cadre de la recherche, il est parfois judicieux que l'exemple soit, dans un premier temps, choisi convenablement dans le but d'aider le questionnement et de simplifier les solutions à élaborer pour ensuite complexifier les méthodes. La demande liée au relevé détaillé, que procurent les techniques d'acquisition, qui nous intéressent, provient souvent d'un souci lié au patrimoine [SGR05] pour sa documentation ou encore pour sa représentation, multimédia par exemple [CAP05], [ALB04] ou bien encore pour faciliter son exploitation [GRU06]. Il peut aussi s'agir d'un relevé motivé par des questions de recherche où la volumétrie détaillée est nécessaire, par exemple.

Le type de relevé lié à notre étude doit être précisé. Notre type de relevé est lié à l'état de l'ouvrage. Celui-ci doit être, en effet, dans des conditions de conservation honorables, c'est-à-dire que l'on doit reconnaître son style et qu'il ne doit pas être à l'état de ruine. Notre recherche ne peut pas s'appliquer à un ensemble d'ouvrages étendus sans le risque de son inutilité. Nous préférons rester dans le domaine où les connaissances de l'architecte peuvent être utilisées. L'utilisation des connaissances

architecturales peut être limitée par la restitution archéologique. Cette limite n'est pas claire, mais pour la validité de notre étude elle ne doit pas être franchie. Le moyen que nous proposons donc pour éviter ce glissement de l'hypothèse architecturale vers l'hypothèse archéologique est de travailler sur des ouvrages dans l'état décrit précédemment.

La figure 1 est une élévation d'une façade endommagée. Les éléments en ruines empêchent la formulation d'hypothèses architecturales comme celles les plans et arrêtes de la volumétrie. Chaque dégradation devient un détail à représenter.

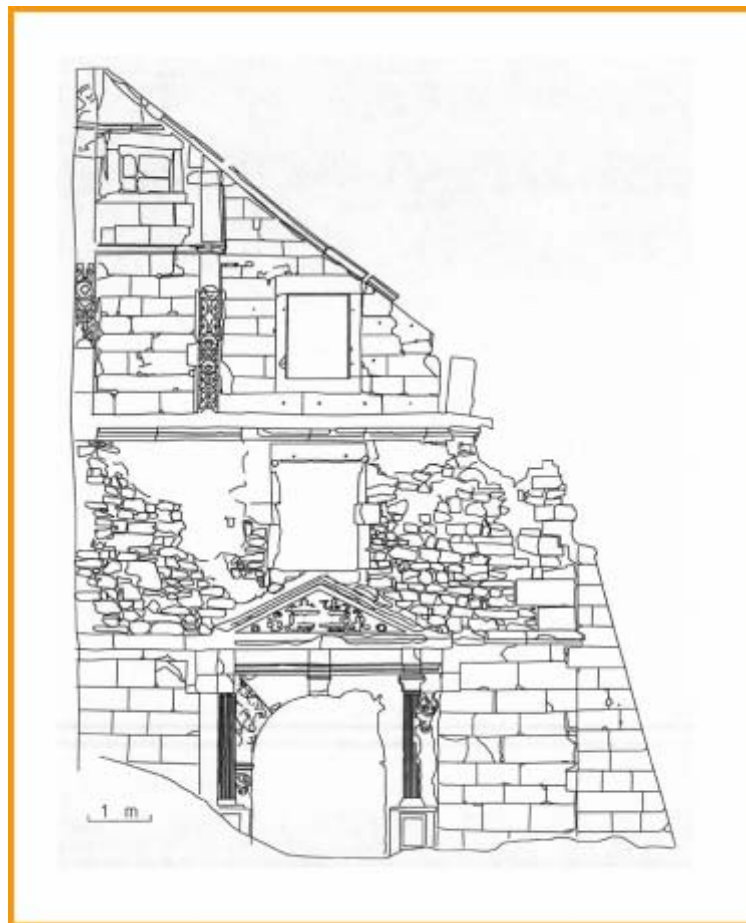


Figure 1 : stéréorestitution d'une façade du château du Lichtenberg (Alsace du nord) Avant restauration (1992) [GRU00]

Les bâtiments relevés appartiennent généralement à l'architecture classique du XVIII^{ème} siècle ou néo classique (XIX^{ème} siècle). Ces bâtiments sont facilement lisibles du point de vue compositionnel et conceptuel et ils sont, de plus, suffisamment documentés. Le corpus de connaissances lié à ces ouvrages est assez étendu. On

peut ainsi retrouver sans trop de difficultés les principes logiques qui ont été utilisés lors de sa conception.

1.1.1.5. Méthodologie

Le terme méthodologie doit être clairement défini. Il s'agit d'une « *étude des méthodes scientifiques, techniques (subdivision de la logique). Abusif : Manière de procéder, méthode.* » [ROB01] ou d'un « *ensemble des méthodes appliquées à un domaine particulier* » [UNI04]

L'intitulé de notre sujet de recherche est, rappelons-le : « Elaboration d'une méthodologie de relevé d'objets architecturaux : Contribution basée sur la combinaison de techniques d'acquisition »

Si l'on se tient à l'abus de langage qui est de confondre méthode et méthodologie, notre sujet, tel qu'il est formulé, ne dissipe pas le malentendu. Un travail de recherche ne constitue pas uniquement la méthodologie liée à un problème, mais il propose aussi des solutions ou encore des pistes, ce que laisse entendre pourtant « élaboration d'une méthodologie ». Si on associe « méthodologie » à « basée sur la combinaison... », on associe alors aisément « méthodologie » à « méthode », ce qui d'ailleurs correspond à un travail de recherche. La critique approfondie de la forme du sujet nous mène aux questions qu'il sous-tend et que nous allons à présent poser.

1.1.2. Mise en place de la problématique

La mise en place des termes importants pour le traitement du sujet nous permet d'énoncer les thématiques qui y sont liées. L'élaboration du questionnement qui va lancer l'étude vient ensuite.

1.1.2.1. Thématiques élémentaires

Le relevé architectural est une activité qui comprend plusieurs thématiques facilement identifiables, à savoir : mesure / acquisition, qui implique un rapport au bâti, aux instruments, aux méthodes de mesure, à la précision nécessaire ou envisageable. D'autre part se trouve la consignation des mesures ; sur le terrain, les mesures doivent être enregistrées de manière à ce qu'elles puissent être

correctement utilisées par la suite. Et enfin nous pouvons identifier la formalisation du relevé. Une fois les mesures effectuées il faut rendre le relevé utilisable ; il faut donc le synthétiser et l'ordonner.

1.1.2.2. Thématiques impliquées

Les trois principales thématiques qui viennent d'être énoncées en induisent trois autres, secondaires mais indispensables, que nous allons brièvement décrire³. Nous pouvons citer la gestion et l'utilisation de données tridimensionnelles ; les données produites par les techniques d'acquisition à distance sont numériques (les supports analogiques ont tous presque disparus, cf. deuxième partie). Ces données doivent être organisées avant d'être finalement manipulées. Ensuite vient la documentation architecturale ; nous évoquons la possible évolution de la combinaison des données vers une vision plus large de combinaison des informations⁴ ; cette évolution implique l'appropriation des connaissances architecturales liées au bâtiment à relever. Et pour finir citons la modélisation informatique ; l'emploi de l'informatique imposé par l'usage des techniques numériques de relevé induit, de façon presque évidente la notion de modélisation avec les outils informatiques de l'objet architectural.

1.1.2.3. Questionnement

Les thématiques que nous venons d'aborder soulèvent des questions que nous pouvons regrouper en trois groupes : le premier concerne l'acquisition, le second la modélisation et le troisième la communication de la méthode de relevé.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'acquisition des données. Elle est la phase de saisie et d'enregistrement des données d'un point de vue général. Dans notre perspective de combinaison, il faut se poser la question relative à la performance vis-à-vis du cas considéré. On peut se demander si dans un cas précis, une technique peut permettre de mieux acquérir des données. Dans le même esprit, il est intéressant d'observer les résultats de plusieurs techniques pour le relevé d'un même objet. C'est grâce à ce genre d'étude que l'on peut, par exemple, distinguer chacune des techniques par son efficacité ou sa rapidité [FUC04]. Une fois que

³ Elles seront plus amplement discutées dans la suite de notre exposé

⁴ Cf. §1.1.3

chacune est utilisée de façon séparée, la question de la combinaison se pose pour essayer de pallier les défauts observés et de capitaliser les avantages considérés. Il reste, néanmoins, à se demander si la combinaison n'apporte pas d'inconvénients majeurs.

La phase de modélisation suit celle de l'acquisition. La combinaison se produit aussi au-delà de l'acquisition. Certes, elle intervient dès le moment du choix de la technique à employer mais également lors de l'étape d'intégration des données. L'usage de modèle tridimensionnel pour représenter le relevé impose le questionnement sur le processus de son élaboration. La maîtrise de la modélisation est un des éléments qui peut nous permettre la combinaison des techniques d'acquisition. La question de la variété des sources de données que la combinaison provoque est toujours présente. La complétude du modèle reste une question que la combinaison ne peut réussir à satisfaire totalement⁵. La modélisation doit pouvoir prendre en compte d'autres informations. La combinaison des techniques d'acquisition, associée à d'autres informations concernant l'ouvrage bâti induit une grande quantité de données à gérer. Cette masse d'information que nous devons ordonner correspond à l'une des questions majeures de notre étude.

Enfin nous pouvons nous interroger sur les aspects liés à la communication. Comme toute recherche, le travail que nous réalisons est destiné à être transmis. La thématique liée à la méthodologie induit la transmission du savoir accumulé et surtout du savoir-faire produit. La tâche attribuée relève de la pluridisciplinarité et procède du rapprochement de deux domaines : l'ingénierie liée à l'acquisition de données tridimensionnelles, d'une part et l'architecture et les corpus de connaissances qui y sont engagés d'autre part. Cette caractéristique induit deux questions réciproques relatives aux deux points de vue. Nous devons essayer de transmettre aux architectes le savoir-faire lié à l'acquisition de données modernes et permettre aux ingénieurs topographes d'accéder aux connaissances architecturales utilisées dans notre travail.

⁵ Cf. §2.5.2

1.1.2.4. Portée de la recherche

Dans un cadre général, le relevé permet l'élaboration d'une documentation dimensionnelle d'un ouvrage architectural. Le processus de documentation d'un bâtiment consiste en la collecte d'informations permettant de rendre compte de l'état physique et fonctionnel d'un ouvrage à un moment donné, avant disparition, rénovation ou dégradation, par exemple. Plus une documentation est précise et complète, plus l'usage en cas de reconstruction ou de modélisation sera fidèle à l'original.

A présent, il faut enrichir la réflexion par rapport au domaine d'intervention et nous intéresser à la question suivante : dans quel cadre peut s'intégrer ce type de travail ? Sachant que l'usage de chacune des techniques d'acquisition considérées relève d'une spécialisation, on peut se poser la question de l'accessibilité de leur combinaison. Si l'on prend en compte la complémentarité possible, la formation en parallèle aux différentes techniques peut être envisageable.

De plus, il est important de noter que notre étude s'intègre dans un cadre technologique en forte évolution. La question de la pérennité de la recherche est primordiale, c'est pourquoi il faut l'inscrire dans un cadre général.

La question de la généralisation ne doit pas occulter celle des limites de la recherche. Il est intéressant de s'interroger sur la possibilité ou l'impossibilité d'un apport de notre étude.

1.1.2.5. Hypothèse

Les hypothèses précises de travail abordant les thématiques particulières relatives aux techniques d'acquisition⁶ et à la modélisation architecturale⁷ seront élaborées à la fin de chacune de ces parties et synthétisées en début de la partie principale⁸. Il est possible, néanmoins, de poser des hypothèses générales dès à présent.

On a pu constater que l'utilisation exclusive d'une seule technique d'acquisition conduit à une carence en informations. La combinaison de plusieurs techniques

⁶ Deuxième partie

⁷ Troisième partie

⁸ Quatrième partie

d'acquisition est un moyen de compenser les lacunes de chaque technique prise à part, mais ne constitue qu'une résolution partielle du problème. Pour permettre l'élaboration plus juste d'une documentation d'ouvrage architectural, il faut considérer l'ensemble ouvert des informations connues concernant l'objet dont font partie les techniques de relevé 3D.

En considérant l'ensemble des informations ainsi disponibles, on se rend compte que les données 3D sont de nature comparable à tout ce qu'il est possible de rassembler à propos d'un bâtiment. L'ensemble des informations est ouvert, dans le sens où la nature des éléments qui le constituent n'est pas déterminée. Alors que des données 3D sont clairement identifiées par les coordonnées XYZ de points, certaines informations sont conceptuelles telles que l'ordonnancement architectural et d'autres sont relationnelles comme les symétries et copies par exemple.

Les données tridimensionnelles sont de l'ordre de la modélisation géométrique, alors que les données listées ci-dessus peuvent constituer un modèle au sens global et fédérateur du terme. L'intégration d'informations d'un autre type que les données géométriques introduit une dimension générale à notre étude, ce qui peut permettre d'envisager une meilleure stabilité des résultats par rapport à une étude de combinaison de techniques centrée sur la fusion et l'exploitation exclusive des données géométriques.

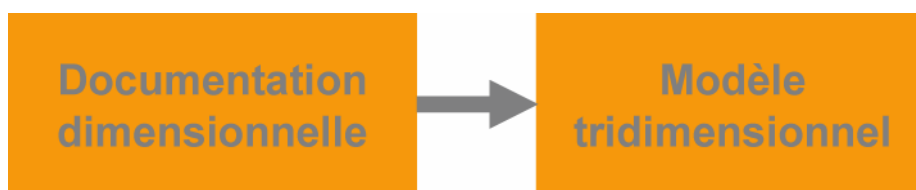


Figure 2 : la documentation dimensionnelle permet la construction d'un modèle tridimensionnel

Une première interprétation du sujet peut être représentée par la figure 2. Les données tridimensionnelles combinées permettent d'aboutir à un modèle tridimensionnel d'un bâtiment. Nous formulons l'hypothèse suivante : pour répondre au sujet il s'agit de se mettre au niveau de la documentation générale et de combiner documentation dimensionnelle et documentation architecturale pour tenter d'obtenir un modèle architectural dont on peut déduire un modèle tridimensionnel (figure 3).

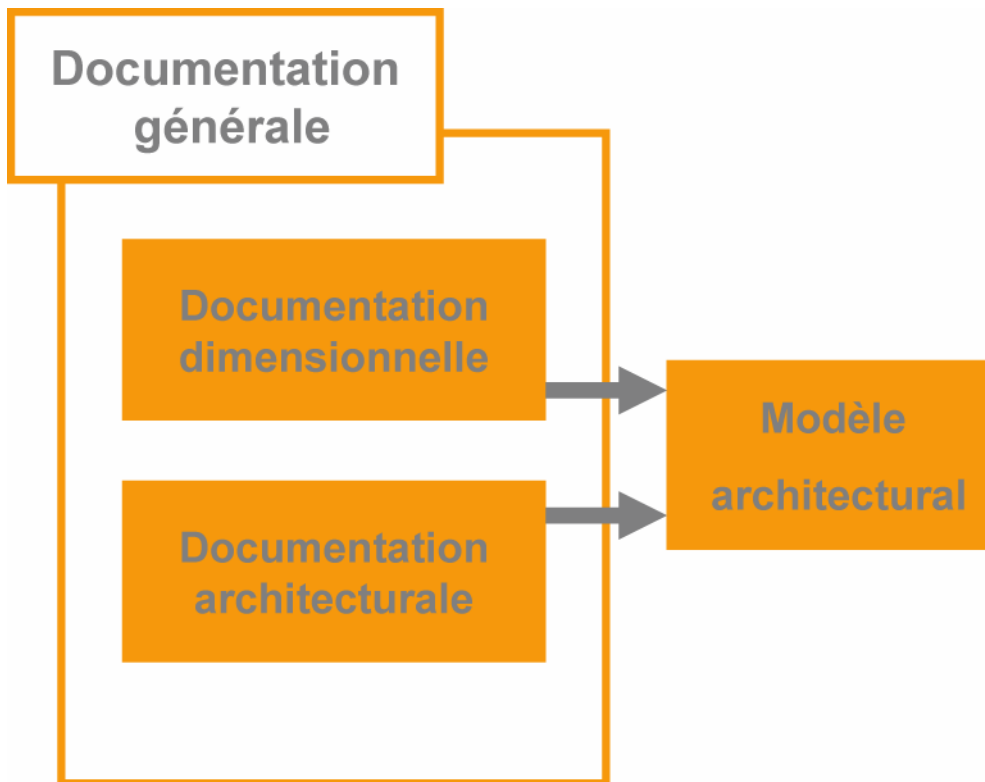


Figure 3 : prise en compte des connaissances architecturales

1.2. Déroulement de la période de recherche

La recherche durant un doctorat est, certes, un travail personnel mais elle se déroule aussi dans un laboratoire. Le travail effectué n'est donc pas le fruit d'une activité individuelle, mais résulte également de l'interaction entre le doctorant et les personnes qui composent ce laboratoire. Ce point est d'autant plus important dans notre cas qu'il s'agit d'un travail relevant de la pluridisciplinarité, déjà évoquée⁹. La plupart des questions liées à notre travail se sont posées au cours d'échanges ou lors de discussions concernant notre sujet de recherche et les thématiques principales du laboratoire. Ainsi la sous-partie qui suit est articulée autour de notre séjour au laboratoire de photogrammétrie de l'INSA de Strasbourg. Ceci ne constitue pas un rapport d'activité, mais prolonge l'interaction établie entre le lieu de travail et la thématique de recherche.

1.2.1. Intégration au sein du laboratoire d'accueil

La majeure partie de notre recherche s'est déroulée au laboratoire PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique). Le travail dans ce lieu relève déjà de la pluridisciplinarité, car étant architecte intégré à ce laboratoire, une première base de transversalité s'instaure ainsi.

1.2.1.1. Immersion

Ma découverte des techniques d'acquisition est liée à mon arrivée dans le laboratoire. L'étude qui en est faite est ainsi liée à cette immersion dans le monde de la mesure à distance, ce qui signifie aussi intégration et participation aux activités de relevé du laboratoire.

1.2.1.2. Pratique

L'étude par la pratique offre la possibilité de se rendre compte en permanence de l'efficacité, de la complexité, du décalage entre théorie et application. L'action est aussi le lieu du questionnement par rapport aux méthodes employées, aux appareils

⁹ Cf. §1.2.3

et techniques utilisés. Toutes ces activités diverses reflètent l'expérience qui contraste avec le point de vue académique¹⁰.

1.2.2. Maîtrise des outils et manipulation des données produites

Une brève description du laboratoire s'impose pour illustrer cette immersion dans le monde de l'acquisition à distance.

1.2.2.1. Equipe

L'équipe qui constitue la base permanente du laboratoire est composée de deux techniciens et de trois ingénieurs topographes dont deux maîtres de conférence et un professeur des universités. Un premier technicien est spécialisé dans la mesure stéréoscopique, et tout ce qui se rapporte à la photogrammétrie ; le second s'occupe de tout le matériel informatique. Les connaissances en télédétection, géomatique et photogrammétrie relèvent des compétences respectives de chacun des trois ingénieurs. A cela s'ajoute entre un et trois doctorants, accompagnés par autant de stagiaires en master et en projet de fin d'études.

1.2.2.2. Unité mixte de recherche 694

Le Page fait partie d'une unité mixte de recherche du CNRS¹¹, l'UMR 694, intitulée UMR MAP : Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le Paysage. Elle est composée de cinq laboratoires basés en France :

- Lyon : ARIA (Applications et Recherches en Informatique pour l'Architecture)
- Marseille : GAMSAU (Groupe de recherche pour l'Application de Méthodes Scientifiques à l'Architecture et à l'Urbanisme)
- Nancy : CRAI (Centre de recherche en Architecture et Ingénierie)
- Toulouse : ASM (Architecture et Sociétés Montagnardes)
- Strasbourg : PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique)

¹⁰ La connaissance des méthodes d'acquisition ne suffit pas à mener à bien une mission ou il faut sans cesse jongler entre les contraintes liées aux modes de calcul photogrammétriques (modes normal ou convergence des prises de vues) et les caractéristiques du lieu qui s'y prêtent difficilement.

¹¹ CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

1.2.2.3. Compétences

Le terme « compétence » recouvre le champ de cinq autres expressions significatives : art, capacité, expertise, qualité et science [ROB01]. L'art est une combinaison entre la connaissance et la pratique que l'on peut reformuler par savoir-faire, ce qui correspond à la partie productive du laboratoire. On peut y manipuler des données aériennes aussi bien que terrestres¹² et y produire des modèles numériques de terrain et d'élévation notamment. Les techniques photogrammétriques et de balayage optique permettent aussi de réaliser des modèles tridimensionnels d'ouvrages bâtis. Le savoir-faire induit la capacité, le potentiel de réalisation et l'expertise. Les connaissances en constant renouvellement permettent le développement des potentiels du laboratoire en parallèle avec l'évolution des techniques qui y sont pratiquées.

1.2.2.4. Matériel

Centré dès sa création sur les techniques photogrammétriques, le laboratoire possède un restituteur analytique à visée stéréoscopique¹³, des stations de restitution numérique avec système de mesure stéréoscopique ainsi qu'un logiciel basé sur les principes multi images. En 2005, le laboratoire s'est doté d'un scanner laser qui complète l'ensemble de mesure à distance. Les besoins en Acquisition laser étaient satisfaits avant cette date par le Capteur laser du CRAI.

1.2.3. Projets

Les projets décrits ci-dessous ne correspondent pas à la totalité des projets qui ont été suivis par le laboratoire, mais à ceux qui ont attiré notre attention. Ces projets correspondent à notre problématique puisqu'ils concernent la documentation d'ouvrages architecturaux. Ils ont été suivis tout au long de notre recherche : chacun a donc son rôle précis dans l'évolution de notre questionnement et de nos recherches¹⁴.

¹² Cf. §2.1.5.1

¹³ Cf. §2.1.3

¹⁴ Les projets sont détaillés en annexe A

1.2.3.1. Initiation

On peut distinguer deux projets qui correspondent à la prise en main du logiciel de photogrammétrie Photomodeler¹⁵. Le photomodèle de l'hôtel de ville de Zurich (Figure 4) et la modélisation géométrique de la rue de l'Argonne à Strasbourg (Figure 5). Dans le premier cas, il s'agit d'un exercice d'apprentissage tiré du jeu de données du CIPA [STR99]. On a pu se rendre compte que la précision de ce genre d'outil est en adéquation avec l'exigence du relevé architectural. La modélisation de la rue de l'Argonne est le premier projet dont le résultat relevait d'une nécessité. Ils s'agissait de modéliser un canyon urbain pour créer un modèle météorologique [RIN04]. Outre l'originalité de l'étude, ce qui nous intéresse ici est l'utilisation d'outils photogrammétriques comme base de modélisation. En effet, chaque bâtiment constituant la rue a été relevé, les points résultant exportés vers un logiciel de modélisation géométrique (AutoCAD) pour finaliser le modèle géométrique.

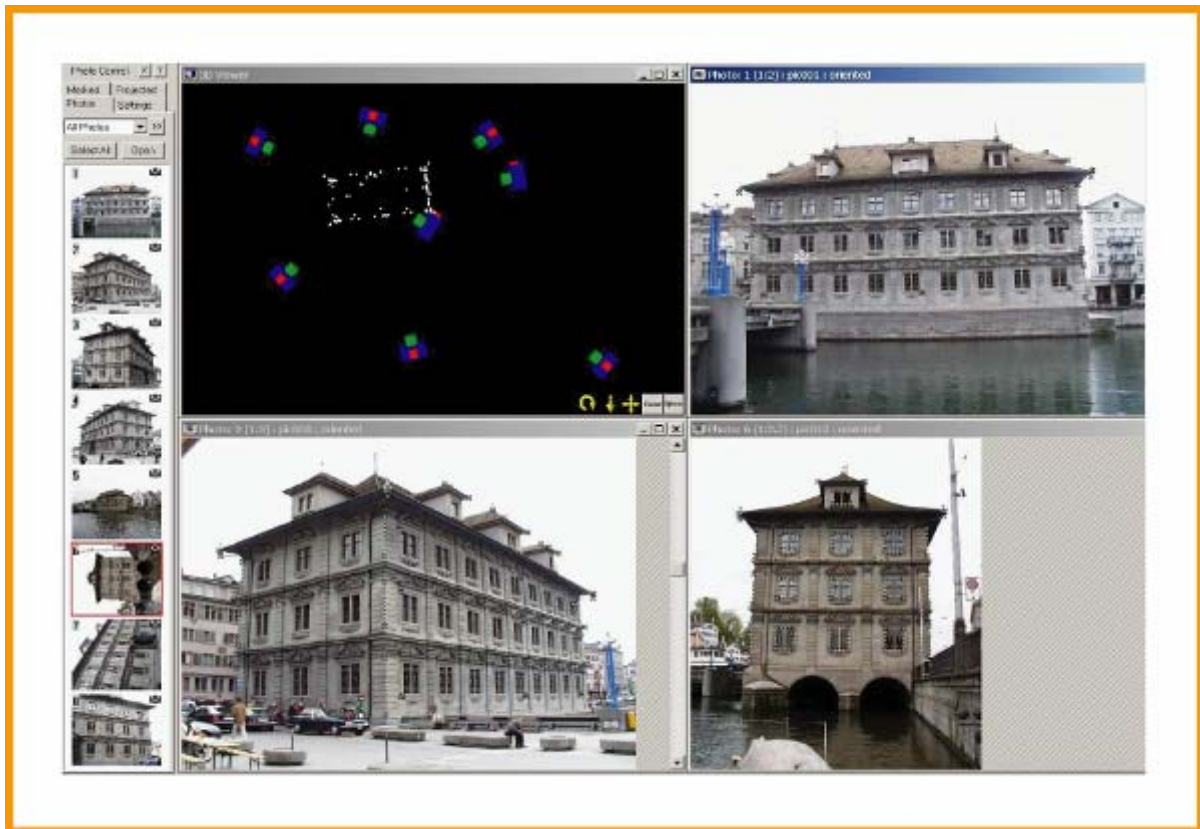


Figure 4 : prise en main du logiciel Photomodeler avec le jeu de données de l'hôtel de ville de Zurich, Suisse du CIPA [STR99]

¹⁵ Cf. § 2.1.4.1

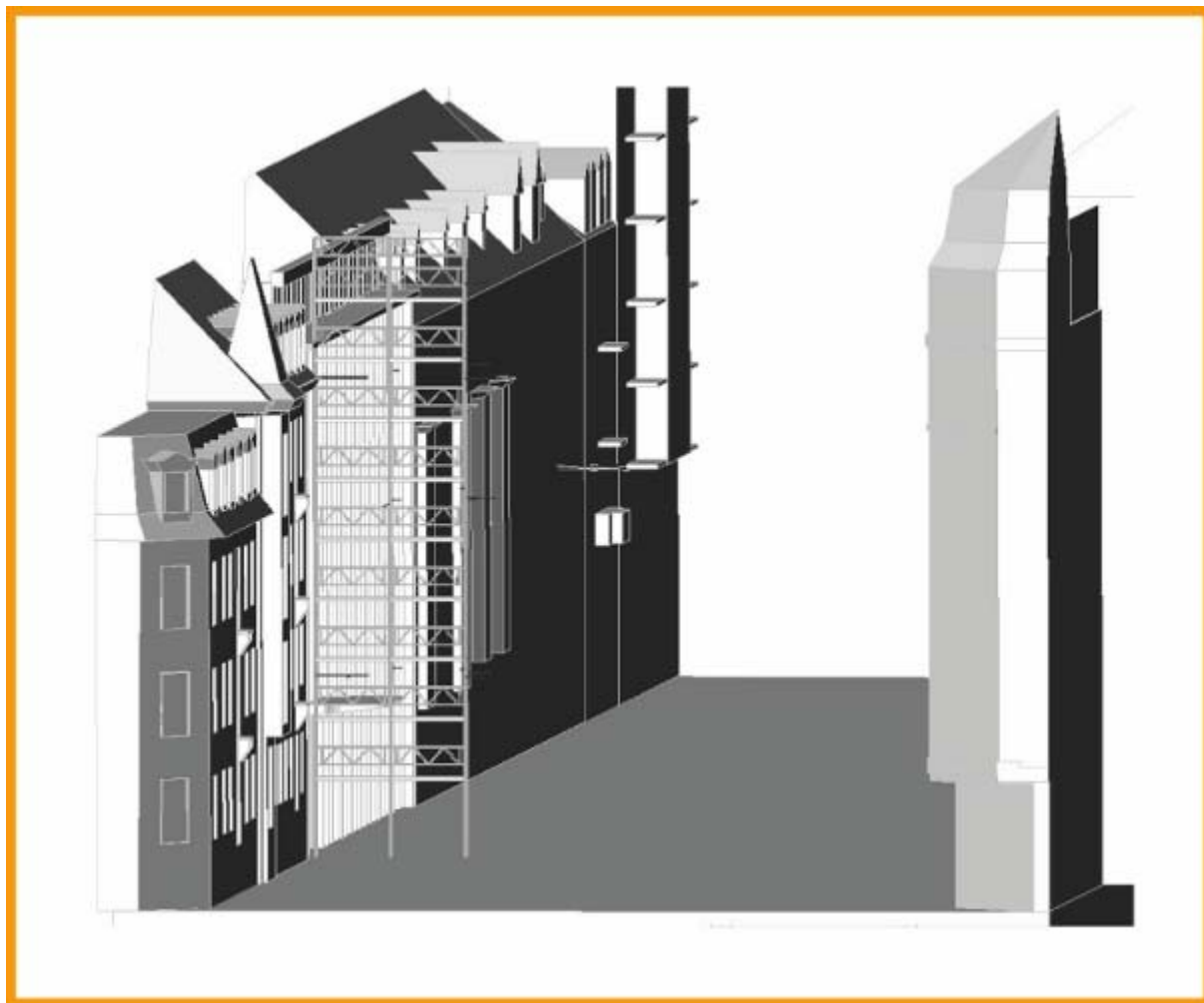


Figure 5 : modèle tridimensionnel de la rue de l'Argonne à Strasbourg

1.2.3.2. Questionnement et essais

Lors des deux projets suivants, à savoir la promenade du Peyrou à Montpellier et le musée zoologique de la ville de Strasbourg, les principales hypothèses se sont élaborées et la recherche a pris son impulsion. Le projet concernant la promenade du Peyrou était une commande de la ville de Montpellier. Il s'agissait d'en effectuer le relevé et d'en faire le modèle tridimensionnel texturé en vue de présentations multimédia. C'est un ensemble de grandes dimensions, qui occupa le laboratoire durablement et qui fut l'objet de combinaisons de techniques d'acquisition expérimentales [FUC04].

Quant à la modélisation du musée zoologique, il ne s'agit pas d'un projet du laboratoire, mais d'un choix d'étude pour la mise en forme de la méthode que nous exposerons en dernière partie¹⁶.

1.2.3.3. Expérimentation

Le lycée international des Pontonniers de Strasbourg, dernier projet sur le laps de temps de notre recherche¹⁷, constitue l'objet expérimental de notre méthode. Notre recherche est intégrée dans le savoir-faire du laboratoire, et ce projet correspond à notre problématique, tout en se soumettant très bien à l'expérimentation.

1.2.3.4. Expérience / Empirisme ?

L'intérêt de l'exposé en cours sur notre travail de recherche au PAGE réside dans la volonté de souligner le rôle variable des projets au cours du temps : d'abord initiatiques, puis réflexifs, et enfin expérimentaux.

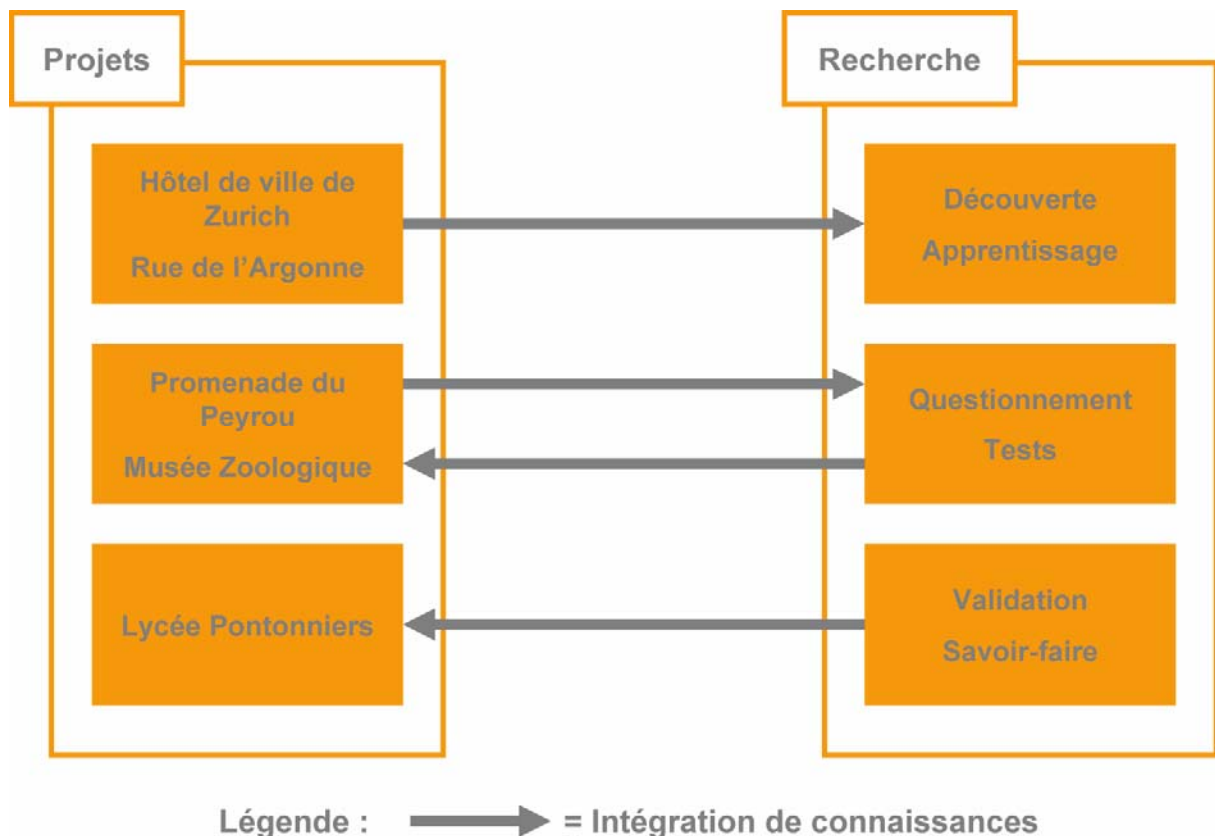


Figure 6 : influence des projets de modélisation sur la recherche

¹⁶ Cf. 4.1.4

¹⁷ Cf. 4.3.5.3.1

Notre investissement suit cette progression : apprentissage, questionnement et enfin restitution du savoir-faire produit. L'apport des projets dans notre travail est indéniable, mais il faut souligner un point : les projets s'apparentent à la même thématique sans être semblables entre eux. Ce qui signifie pour nous que la réponse que nous argumentons dans la dernière partie n'est pas une réponse à un problème type issu de la pratique de ces projets, mais ces derniers ont été vecteurs de questions et de réponses pour notre recherche.

Cet exposé permet aussi la mise en valeur du principe d'induction¹⁸ que nous avons pratiqué concernant certains points de notre recherche.

1.2.4. Enseignement

Le dernier point concernant le déroulement de cette période de recherche est l'enseignement. Il constitue un aspect non négligeable dans la contribution à nos réflexions.

1.2.4.1. Enseignement, recul et synthèse

L'enseignement est directement lié à l'activité de recherche. La recherche étant le moment de regroupement des connaissances et l'enseignement le moment de leur restitution. La recherche est une phase d'accumulation d'informations, ponctuée de phases de synthèses permettant la réflexion et dont l'enseignement prend part aux par la nécessité de clarté dont il faut faire preuve pour rendre possible la transmission du savoir. L'enseignement d'une discipline prodigué à des étudiants diffère de la façon dont on en a appris les rudiments. En effet, la réflexion liée à la pédagogie provoque une reconsidération du savoir, et, parfois, permet un approfondissement de certains points jugés inutiles à la recherche mais indispensables à la synthèse précédant la restitution. L'enseignement de l'acquisition tridimensionnelle relative à l'architecture a permis une prise de recul et une reconsidération des bases de nos connaissances. Le changement de point de vue est très important pendant un travail de recherche ; les enseignements que nous avons dispensés nous ont donné l'occasion de le faire.

¹⁸ Manière de raisonner qui consiste à aller du singulier au général et des effets à la cause [UNI04].
Opération mentale qui consiste à remonter des faits à la loi [ROB01].

1.2.4.2. Relation entre recherche, enseignement et expérimentation

L'enseignement, directement lié à la recherche, peut parfois donner lieu à des expérimentations partielles et multiples. La possibilité de pouvoir donner un même exercice à plusieurs étudiants permet de tester la valeur de nos hypothèses par la multiplicité des réponses. Cette pratique ne doit pas être systématique, mais lorsque le sujet est proche de nos préoccupations, cela provoque un échange constructif. L'expérimentation multiple et objective, réalisée par une tierce personne, est un moyen de vérification puissant et provoque la validation ou la réfutation des hypothèses.

Dans cette troisième sous-partie, il nous est apparu essentiel d'aborder les différentes interactions qui ont eu lieu entre tous les éléments qui ont constitué notre période de recherche à savoir les recherches liées au sujet, l'environnement ou encore le matériel disponible. A l'issue de cette analyse, nous allons étudier l'enrichissement et la confirmation de nos hypothèses.

1.3. Contexte : documentation du patrimoine et acquisition de données 3D

La définition du contexte permet de resituer le sujet et le travail de recherche qui en découle dans l'univers qui le rend utile. L'exposition du contexte justifie l'existence du travail et permet de répondre aux questions relatives à la nécessité de la recherche. La documentation d'ouvrages architecturaux est motivée par l'intérêt que l'on porte à chacun d'entre eux. Le contexte doit nous permettre de répondre à la question de l'utilité de documenter certains bâtiments. Pour parvenir à une réponse, il s'agit, dans un premier temps, de définir certains termes suivants: « patrimoine architectural », « monument historique », et « sauvegarde du patrimoine ».

Ensuite, l'exposition des organismes intéressés et permettant la convergence des intérêts fixera le contexte institutionnel de nos recherches. On peut associer à la notion d'organisme de sauvegarde les interrogations concernant le type d'ouvrages à classer, le choix des monuments à protéger et les modes de restauration. Quant aux organismes de documentation, on peut y adjoindre les questions sur la façon d'effectuer le relevé, mais aussi sur les techniques à utiliser ou encore sur la manière d'enregistrer les données et leur représentation.

1.3.1. Patrimoine et monuments

Les notions définies ici sont importantes car elles interviennent directement sur la façon d'appréhender le relevé de l'ouvrage. Leur qualification influe sur les préoccupations de notre recherche, car les spécifications, précautions et méthodes en dépendent en partie. Un ouvrage architectural fait partie du patrimoine culturel s'il est remarquable, s'il constitue le témoin d'un événement, d'une époque, d'une pratique qui relève de moyens de construction originaux, s'il illustre l'histoire.

Certains ouvrages bâtis créés par l'homme perdurent et sont transmis aux générations suivantes. Leur caractère artistique les inscrit souvent dans un patrimoine architectural.

Le mot patrimoine prend la signification que l'on cherche à définir pendant la période de prise de conscience et de vulgarisation de la notion d'héritage culturel que représentent les années 1970. Ce terme est d'origine juridique [CHO92] (associé à « bien matériel » et « succession ») et a été choisi pour insister sur le caractère

collectif de l'héritage. Le patrimoine peut ainsi être européen ou encore mondial. Le patrimoine comprend aussi bien des objets que des bâtiments ou encore des lieux. Comme la réutilisation de ce terme est encore récente, sa définition évolue encore et englobe depuis les années 1990 toute production humaine. Cet aspect généraliste permet d'éviter les contestations sur le caractère artistique ou non de tout artefact humain remarquable. Par extension, certains paysages qui constituent l'environnement de l'homme et qui sont soumis à dégradation font partie du patrimoine.

On peut résumer la notion de patrimoine par la citation suivante : « *Le concept de patrimoine peut s'articuler sous trois rubriques. La première constate ce qui du passé mérite d'être conservé ; la seconde touche aux motivations qui conduisent à accepter le passé ou à le rejeter ; la troisième, d'ordre pratique, concerne les modalités par lesquelles le patrimoine a été progressivement apprécié, conservé et transmis* » [LEN04].

La notion de patrimoine architectural et celle de monument sont étroitement liées. En France, la notion de patrimoine architectural apparaît après l'Italie et l'Allemagne. Avec le temps, l'intérêt pour l'ouvrage est plus lié à l'objet lui-même comme vision historiciste qu'à son importance nationale au début du **xx^{ème}** siècle. La vision archéologique consiste à intégrer l'ouvrage dans le déroulement de l'histoire dans laquelle il s'inscrit. Elle prend le dessus sur le simple intérêt d'ancienneté [CHA80]. Cette approche plus scientifique du monument impose une rigueur dans son analyse. Cette exigence archéologique est parfois destructive pour le monument. Ce point de vue donne du poids aux décisions à prendre vis-à-vis de l'intervention. L'ouvrage est considéré par rapport à sa durée de vie et non pas par rapport à l'état dans lequel il se trouve. La question est de révéler toutes les périodes significatives d'un monument tout en lui laissant un aspect cohérent. Une telle démarche s'accompagne d'un grand besoin documentaire, condition qui n'est pas toujours remplie. Le bâtiment est lui-même source de documentation, à la fois pour la compréhension qu'on peut en avoir ainsi, que pour appréhender d'autres ouvrages. L'investigation archéologique de chaque bâtiment impose une documentation permanente, car tout est déposé pour retrouver les états antérieurs.

La notion de monument historique est une réduction du terme patrimoine à l'architecture. La notion de monument historique est plus ancienne que celle de patrimoine. Elle est liée à la transmission d'un message vers l'avenir. Les destructions révolutionnaires ont provoqué un intérêt national pour ce qui devient monument historique. Un monument peut être construit intentionnellement comme tel ou classifié *a posteriori*. Aloïs Riegl, historien de l'art viennois du XIXe siècle, auteur du *Culte moderne des monuments* (1903), distingue trois valeurs du monument [RIE84]:

– La première valeur énoncée par Riegl dans son ouvrage correspond à la valeur d'ancienneté :

Le bâtiment a des caractéristiques qui ne le situent pas dans l'époque contemporaine. La valeur d'ancienneté est aussi une référence à l'esthétique plus facile à utiliser et à saisir que les deux autres valeurs. Il s'agit de « *toutes les créations de l'homme, indépendamment de leur signification ou de leur destination originelles, pourvu qu'elles témoignent à l'évidence avoir subi l'épreuve du temps* ». C'est aussi la notion la plus récente des trois et celle qui regroupe le plus de monuments. Ce sont, par exemple, des édifices de représentation à dimension monumentale, tels que châteaux et palais.

– Dans un deuxième temps vient la valeur historique :

L'ouvrage représente une époque particulière. L'intérêt pour le bâtiment apparaît, dans ce cas, plus pour son état initial que pour son état actuel. La fonction pour laquelle il a été construit transparaît dans l'ouvrage. Le bâtiment véhicule un savoir faire à travers le temps. La valeur historique est soumise, plus que les deux autres, aux intérêts variables d'une époque sur l'autre. « *[Ces bâtiments sont] ceux qui renvoient encore à un moment particulier, mais dont le choix est déterminé par nos préférences subjectives* ». Pour illustrer ce type de monument, on peut citer des objets construits dans un but purement utilitaire comme les ponts, les lavoirs, les fours à pain ou les moulins, par exemple.

- Puis, Riegl introduit la valeur de remémoration intentionnelle :

Les monuments commémoratifs n'ont jamais eu d'autre fonction que leur rôle de mémoire, fonction qui était d'emblée symbolique comme les arcs de triomphe ou les monuments aux morts. *« Œuvre créée de la main de l'homme et édifiée dans le but précis de conserver toujours présent et vivant dans la conscience des générations futures le souvenir de telle action ou telle destinée ».*

Cet intérêt pour les bâtiments, plus précoce que pour la notion de patrimoine étendue, a conduit à la création en France de l'Inventaire général en 1964. L'inventaire divise sa tâche en thématiques dont il examine les représentants pour en extraire les éléments les plus remarquables mais aussi les plus représentatifs. Les éléments particuliers retenus sont examinés plus en détail.

L'année 1975 a été proclamée comme année du patrimoine architectural en Europe. Cette première manifestation de ce genre était destinée à sensibiliser la population au concept d'héritage culturel et de mise en valeur du patrimoine. Malgré des résultats mitigés, cette année fut conclue par l'adoption de la charte européenne du patrimoine architectural.

Citons ici l'introduction de la charte pour saisir les intentions qui l'ont fait naître. *« Grâce à l'initiative prise par le Conseil de l'Europe en proclamant 1975 Année européenne du patrimoine architectural, de gros efforts ont été déployés dans l'ensemble des pays européens pour sensibiliser l'opinion aux valeurs culturelles, sociales, économiques, irremplaçables des monuments, des ensembles et sites en milieu urbain et rural hérités du passé.*

Il importait de coordonner tous ces efforts au niveau européen, de créer une vision commune du problème, et surtout de forger un langage commun dans l'énoncé des principes généraux qui doivent guider l'action concertée des instances responsables et des citoyens. [...]

Certes, au-delà de la formulation des principes, se pose le problème de leur application.

L'action future du Conseil de l'Europe tendra à approfondir les possibilités d'application de ces principes dans les différentes situations nationales et à progressivement améliorer les législations et les réglementations en vigueur, ainsi que la formation professionnelle dans le domaine considéré.» (Introduction de la charte [CHA75])

En 1980, ont lieu des manifestations semblables à celles de 1975. On peut retenir la création de la direction du patrimoine du ministère de la culture et de la communication, sous l'autorité de laquelle on place l'inventaire général, dont les intérêts sont élargis au-delà de l'architecture. Dans le même élan, l'inventaire organise des assises européennes permettant de mettre en commun et de comparer les méthodes pour inventorier l'héritage monumental.

1.3.2. Conservation et restauration du patrimoine architectural

La question de la conservation d'un élément du patrimoine se pose après le « *processus d'acceptation de l'héritage* » qu'il représente [LEN04]. La façon de traiter l'artefact dépend directement des raisons pour lesquelles il a été repéré comme tel.

Le besoin de conservation évolue parallèlement à la société. Celle-ci comme par exemple celle du Moyen Age en Occident, a beaucoup produit tout en se souciant peu de conserver. Ce n'est qu'à la Renaissance que l'on commença à se retourner vers le passé et à vouloir garder certains éléments qui provenaient du Moyen Age. Puis, au *xviii^{ème}* siècle « *Le premier sentiment de l'homme fut celui de son existence, son premier soin celui de sa conservation.* » [ROU95]; et enfin à l'époque contemporaine : « *La conservation se révèle [...] un facteur essentiel de l'évolution et du progrès* ». [BAZ04]

Les termes de conservation et restauration sont étroitement liés. La restauration est directement incluse dans la notion de conservation. Les principes de conservation ont aussi beaucoup changé. Jusqu'à la fin du *xvi^{ème}* siècle, tout élément manquant était reconstitué le plus fidèlement possible pour l'époque. En revanche, à l'époque baroque, les éléments tels que les sculptures sont intégrés dans des compositions, c'est-à-dire réutilisés en quelque sorte. A d'autres époques, au *xviii^{ème}* siècle par exemple, la transposition, que l'on peut presque assimiler à une copie, est le moyen de conservation pratiquée (à l'échelle de l'art pictural).

Quant à la conservation, on peut évoquer la notion d'entretien : certains ouvrages ont toujours été entretenus et le sont toujours, telle la cathédrale de Strasbourg sur laquelle l'Œuvre Notre Dame travaille depuis sa construction.

En France, à partir de la Révolution, la notion de conservation s'enrichit avec, l'apparition de la conscience de la valeur des artefacts. Cet élan est favorisé par l'importante et rapide destruction de monuments, conséquence de la Révolution. Au regard de ce vandalisme, des mesures ont été prises en faveur de la conservation de tous « *les objets qui peuvent servir aux arts, aux sciences et à l'enseignement* » [BAZ04]. Au début du XIX^{ème} siècle, la conscience de la destructivité de certaines restaurations conduit à une révision du concept de restauration des œuvres telles les sculpture et peinture. Les œuvres seront laissées en l'état de leur découverte. Cette prise de conscience nationale entraînera peu à peu la création de méthodes d'intervention sur les objets conservés. A cela s'ajoute un mouvement spontané de regroupements de personnes intéressées par le sujet, qui accéléreront l'étude des monuments.

Ainsi, le XIX^{ème} siècle voit la mise en place de principes encore utilisés aujourd'hui, que l'architecte Viollet-le-Duc (1874-1879) pratique sur un très grand nombre d'entités. Ses interventions constituent la fondation des modes modernes de conservation des monuments historiques en France. Ce type de restauration consiste à restaurer le monument tel qu'il aurait dû être. Cette façon de faire étant liée aux techniques du moment, les restaurations de ce type sont datées par la période d'intervention¹⁹ [BAZ04].

Puis, au XX^{ème} siècle, se dégagent deux grands aspects. En France, le classement des monuments est effectif depuis la loi de décembre 1913 ; les bâtiments deviennent monuments historiques. L'Etat a les moyens juridiques de permettre la conservation des artefacts, aussi bien publics que privés. La préoccupation généralisée pour la conservation des œuvres d'art, dans la deuxième partie du siècle, mène l'U.N.E.S.C.O²⁰ à réaliser un grand nombre d'avancées pour la sauvegarde des monuments menacés. La création de l'ICOMOS²¹ en 1964 atteste de cet élan. Ces grandes institutions sont à la fois le fruit de l'intérêt international

¹⁹ Très controversé de nos jours

²⁰ Cf. p27

²¹ Cf. p29

pour la conservation des œuvres d'art et, en même temps, elles sont des sources de dynamique qui relayent cette motivation. [POM04]

Suite à l'intérêt porté à la restauration, la notion de liste et de classement s'est développée au XIX^{ème} siècle avant d'être entérinée par la loi de 1913 en ce qui concerne les bâtiments et 1941 pour les œuvres d'art. Pendant la période de vandalisme qui a suivi la Révolution, toutes les pièces d'ouvrages qui pouvaient échapper aux destructions étaient conservées et donc recensées. Quand on stocke, entretient ou dénombre, la création de catalogues s'impose. Le problème des listes réside dans leur nature, entre sélection ou exhaustivité, c'est-à-dire entre classement ou inventaire [LEN04], car en fonction du rôle qu'on lui donne, la liste prend différentes formes. La législation permet le contrôle grâce à des subventions.

Autant la conservation relève des instances politique et décisionnelle, autant la restauration est, et doit être, la préoccupation de professionnels : architectes et archéologues. L'administration a son rôle à jouer dans la conservation du patrimoine du point de vue de la protection, du classement ou encore du financement, mais il faut laisser l'intervention se faire grâce aux connaissances et au savoir-faire des gens de métier.

On peut répartir les monuments en deux parties : les ouvrages désaffectés et ceux qui sont occupés. Ces derniers nécessitent un entretien permanent qui tient de la restauration commune, mais qui peut se révéler très destructeur. Prenons l'exemple d'un ravalement de façade : c'est une opération qui s'effectue à répétition et qui peut provoquer la modification voire la suppression, à terme, de certains détails qui constituent la particularité de la composition de l'édifice. Ainsi, même à ce niveau, l'aval et le travail d'un architecte ont leur importance. Pour l'intervention sur un ouvrage désaffecté, il faut traiter les questions plus en profondeur : le lieu sera-t-il réhabilité, reconvertit, restauré ? Dans quels buts intervenir ? Ce sont autant de questions qu'il faut se poser et mettre en relation avec l'histoire, les origines et la construction de l'ouvrage classé. *« Une restauration n'est ni une réfection ni une réparation, ou plutôt elle ajoute quelque chose à l'une et à l'autre. On répare une machine cassée pour qu'elle fonctionne, on refait une installation endommagée pour qu'elle soit utilisable, mais la restauration a une ambition différente : l'objet auquel elle s'applique : meuble, tableau, demeure, sanctuaire, édifice, site..., possède un*

intérêt, une dignité ou un prestige, parfois modestes, parfois éminents, qui nous en imposent. Nous éprouvons un certain sentiment de responsabilité à leur égard parce qu'ils appartiennent au monde de la culture. En effaçant dans un ouvrage les effets ruineux du temps, en éliminant les altérations dues aux hommes, la restauration le remet en quelque sorte dans l'histoire avec de nouvelles chances de durée, mais ce travail est lui-même une action historique et donc datée, dans son esprit comme par ses méthodes. » [CHA04].

L'exemple des interventions de Viollet-le-Duc s'impose. La doctrine qu'il a mise en place en prônant la restauration intégrale de l'ouvrage, c'est-à-dire dans l'état d'origine²², a longtemps été utilisée et retenue pour une grande sélection d'ouvrage. Ce type d'intervention a permis de conserver et de mettre en valeur un grand nombre d'édifices, mais a également participé à la rupture entre les bâtiments anciens et l'architecture contemporaine de l'époque en gommant les ajouts et remaniements qui y avaient été adjoints. Ce courant, à l'allure excessive, a mis à l'écart les ouvrages non représentatifs, composites ou encore de taille modeste, ne pouvant subir une restauration intégrale. Il est à noter une certaine contradiction dans cette attitude de restauration, car elle est plus facile à mettre en place lorsque les techniques de l'époque de restauration et de construction ont un grand nombre de points communs. Ainsi, depuis le XIX^{ème} siècle, les méthodes de construction et les matériaux ayant fortement évolué, il serait beaucoup plus difficile d'appliquer les principes de Viollet-le-duc.

On peut noter le fragile équilibre entre classement, restauration et entretien des monuments. Il peut être malmené par une prise de pouvoir d'un parti comme de l'autre que ce soit l'administration ou le restaurateur. C'est pour cela qu'il est indispensable de renforcer le lien entre décisions et réalisations, sachant que l'aspect culturel est le seul objectif de toute intégration patrimoniale.

L'évolution de la notion de patrimoine depuis la charte de 1975 introduit la notion de cadre et de développement au sein même du patrimoine, ce qui s'oppose à l'aspect de catalogue des premiers élans. La dimension patrimoniale est à intégrer directement à celle d'aménagement, car son premier objectif n'est-il pas la

²² Supposé à l'époque. La question sur la notion d'état originel est difficile à aborder car elle aussi évolue au fil du temps.

constitution d'un corpus, d'un fond culturel pour le bon développement de l'humanité ? [CHA04]

1.3.3. Organisme de protection du patrimoine

Comme on l'a vu dans les chapitres précédents, pour sauvegarder le patrimoine, il faut des organismes capables de gérer la complexité qui en découle. De plus, il faut pouvoir légiférer et intervenir. C'est le rôle d'organismes non gouvernementaux tels que l'UNESCO et l'ICOMOS.

1.3.3.1. UNESCO

« Les guerres prenant naissance dans l'esprit des hommes, c'est dans l'esprit des hommes que doivent être élevées les défenses de la paix » Acte constitutif de l'UNESCO.

L'UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture) est l'une des seize institutions de l'Organisation des Nations Unies. Elle a été créée en 1945 et vit juridiquement le jour en 1946. Elle compte 190 états membres en 2003. Le postulat de base de l'UNESCO est de « construire la paix dans l'esprit des hommes » par le biais de l'éducation. Son intervention est fondée sur le respect des civilisations et des cultures. En 1972 a été adoptée la convention pour la protection du patrimoine mondial culturel et naturel : *« [...] Considérant que la dégradation ou la disparition d'un bien du patrimoine culturel et naturel constitue un appauvrissement néfaste du patrimoine de tous les peuples du monde [...] »*. Elle soutient l'idée que certains sites ont une valeur universelle exceptionnelle et doivent, faire partie du patrimoine commun de l'humanité. L'UNESCO a donc créé la liste du patrimoine mondial qui comprend plus de 700 sites naturels et culturels.

Les réalisations de l'UNESCO s'articulent autour de quatre grands axes. Pour en faire un exposé clair, ces axes seront cités mais développés proportionnellement à l'intérêt de notre exposé.

Les quatre axes sont la coopération intellectuelle, l'activité normative, l'activité éthique et l'activité opérationnelle.

Coopération intellectuelle : qui a permis par exemple la création du C.E.R.N.²³ en 1954.

Activité normative : grâce à cette activité l'Unesco a pris une importance considérable en ce qui concerne la protection du patrimoine architectural. Les pays membres s'engagent à suivre les recommandations de l'Unesco. Depuis 1968, un système de contrôle sur les pays a été institué : un organe subsidiaire du conseil exécutif, le comité des conventions et des recommandations, procède à l'examen des rapports périodiques des gouvernements. Le comité donne du poids à l'Unesco pour rendre possible certaines actions.

Activité éthique : Cette branche de l'Unesco suscite des discordes entre les Etats membres, car c'est la branche responsable des problématiques de désarmement et des droits de l'Homme.

Activité opérationnelle : L'Unesco met en place des projets-exemples, pour donner une dynamique aux gouvernements. De 1998 à 2001, un projet sur l'interaction Europe-Afrique : « La ville : réseau des cultures entre Yaoundé (Cameroun) et Strasbourg » a vu le jour [UNE04].

L'aspect non gouvernemental et international de cette institution en fait un outil puissant mais en même temps très fragile. De même, l'ampleur des tâches à réaliser est tel que l'établissement de programmes est assez complexe et par conséquent ralentit le processus.

1.3.3.2. ICOMOS

La création de l'ICOMOS, Conseil International des Monuments et des Sites (International Council on Monuments and Sites), correspond à la deuxième résolution adoptée, sur l'initiative de l'Unesco, pendant le deuxième congrès international des architectes et techniciens des monuments historiques de 1964 à Venise la première étant la charte de Venise. Celle-ci est une amélioration de celle d'Athènes de 1931 qui a été initiatrice de la conscience du besoin d'internationaliser la question de la sauvegarde du patrimoine. La charte d'Athènes correspond aussi à la prise de conscience des erreurs ayant entraîné la perte du caractère et des

²³ C.E.R.N. : Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

valeurs historiques des monuments. Elle introduit la nécessité de l'usage de techniques modernes pour les travaux de restauration.

L'ICOMOS vise à rassembler les spécialistes de la conservation à un niveau international pour permettre le dialogue professionnel et faciliter les échanges. Cette plateforme rend possible la mise en commun des connaissances sur les principes et les techniques de conservation. Il est possible d'y approfondir et d'y diffuser les informations dans ce domaine. Cette collaboration permet de créer des centres de documentations spécialisés dans la conservation. Le regroupement de professionnels, impliqués dans le milieu de la conservation du patrimoine, permet d'encourager l'adoption et l'application des conventions internationales sur la mise en valeur du patrimoine architectural. Cette fédération de savoir-faire permet enfin d'élaborer des programmes de formation pour les spécialistes de la conservation sur le plan international.

Les activités de l'ICOMOS tendent vers un accroissement de sa présence à travers le monde en incitant à la création et au développement des comités nationaux de l'ICOMOS. Il cherche à agrandir l'influence de la charte de Venise en produisant des textes doctrinaux flexibles pour des secteurs spécifiques du patrimoine architectural. L'ICOMOS s'atèle à la définition de techniques de gestion adaptables pour les biens culturels. Il participe au développement de programmes de formation en relation avec les comités nationaux. De plus, L'ICOMOS enrichit continuellement le centre international de documentation consacrée au patrimoine architectural (UNESCO-ICOMOS) à Paris. La tâche de l'ICOMOS est aussi d'organiser et de gérer les missions d'experts sollicités par des administrations culturelles qui estiment fondamentale l'intervention d'un consultant pour une question de conservation particulière. Enfin, l'ICOMOS tient un rôle de conseil auprès de l'Unesco au sujet des biens culturels à inscrire sur la liste du patrimoine mondial et sur le suivi des biens déjà inscrits.

1.3.4. Organismes d'acquisitions de données 3D, documentation :

Au cours des paragraphes suivants, il sera question des institutions coordonnant les techniques d'acquisition. L'ISPRS et L'ICOMOS ont des rôles équivalents dans leur

domaine respectif (Acquisition à distance et patrimoine). Ils se sont rapprochés en créant le CIPA²⁴.

1.3.4.1. ISPRS

ISPRS signifie en anglais *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* ce qui correspond à Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection.

« La société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection est une organisation internationale non gouvernementale, qui se consacre au développement de la coopération internationale en vue du progrès des connaissances, de la recherche, du développement, de l'enseignement et de la formation dans le domaine de la photogrammétrie, de la télédétection et des sciences de l'information spatiale, de leur intégration et de leur application pour contribuer au bien-être de l'humanité et à la préservation de l'environnement »²⁵[ISP00]

L'ISPRS stimule la recherche et le développement dans les domaines des sciences de l'information spatiale, et encourage l'établissement de normes. La participation de l'ISPRS aux recherches réside dans la création de Commissions Techniques et de Groupes de Travail spécifiques. Ainsi, il y a huit commissions techniques dont deux consacrées à la photogrammétrie, deux à la télédétection, deux autres encore aux systèmes d'informations géographiques et les deux dernières aux capteurs et à l'éducation. Ces commissions sont subdivisées en groupes de travail dont le sujet de recherche est spécifique. Le regroupement des chercheurs par thème permet une synergie et la mise en commun d'expériences et de questionnements. Au-delà des commissions et groupes de travail, l'ISPRS organise des congrès internationaux, des communications, débats, cours et des visites techniques. Les communications et résultats de recherches sont largement diffusés, notamment par le biais de la publication des archives de l'ISPRS. De plus, elle édite une revue et un bulletin, les deux au niveau international. Ainsi, tout ce qui touche la photogrammétrie, la télédétection et les sciences de l'information spatiale se trouve relayé par ce dispositif de publication et d'échange. Tout comme l'ICOMOS, l'ISPRS favorise la

²⁴ Cf. §1.3.4.2

²⁵ Statuts de l'ISPRS

constitution au plan national et régional de sociétés de photogrammétrie et télédétection, comme en France la SFPT²⁶.

Dans ses statuts, il est stipulé que l'ISPRS doit coopérer avec des institutions ou des organisations internationales et régionales impliquées dans toute discipline présentant un intérêt pour elle et surtout avec « *les organismes intergouvernementaux des Nations Unies et toute autre organisation internationale susceptible de définir des politiques dans ce domaine* »²⁷.

1.3.4.2. CIPA

Le Comité International de Photogrammétrie Architecturale est le fruit de l'initiative de L'ICOMOS et de L'ISP, l'ancêtre de l'ISPRS, lors d'un colloque sur les applications de la photogrammétrie au relevé architectural en 1968. Le CIPA assure ainsi la liaison entre les deux grandes organisations liées au patrimoine, d'une part, et liées à l'acquisition de données, d'autre part [PAT04]. Le CIPA se donne pour mission de favoriser la documentation du patrimoine culturel par l'emploi des techniques d'acquisition à distance, photogrammétrie rapprochée et aérienne, télédétection et balayage laser. Les méthodes de gestion des données sont aussi incluses dans les centres d'intérêt du CIPA. L'intérêt d'une structure comme le CIPA réside dans l'ouverture vers d'autres disciplines, ce qui permet d'enrichir ou de mettre à jour certains procédés, et ainsi, de faire progresser les méthodes existantes. Le CIPA tente de faire évoluer les techniques et méthodes en encourageant les programmes novateurs. Le CIPA hérite des dimensions internationales des organisations qui l'ont fondé : coopération dans le domaine de l'acquisition de données, liens renforcés avec les professionnels de la conservation du patrimoine. La mission de formation envers des professionnels d'autres domaines est essentielle et donne lieu à la création de tutoriaux et l'édition de règles de base [WAL94].

1.3.5. Patrimoine et acquisition 3D, conclusion

« Tout compte fait, on devrait arriver à une définition qui, en associant une certaine valeur de caractère traditionnel à son objet, invite à appréhender le patrimoine comme une catégorie de l'existant dépassant l'usage présent. [...] »

²⁶ Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection

²⁷ Statuts de l'ISPRS : http://www.isprs.org/documents/statutes_and_bylaws2000_f.html

Le patrimoine est ce dont la préservation demande des sacrifices, ce dont la perte signifie un sacrifice. [...]

Par définition, le patrimoine comporte une perte, un affaiblissement constants. Sans les altérations et les menaces, une prise de conscience sérieuse n'a pas lieu [...].»
[CHA80]

Le patrimoine architectural participe à la prise de conscience culturelle de l'humanité de par son existence. Les monuments, mêmes disparus, contribuent en tant que témoins d'une période, au positionnement de l'homme dans son époque et dans son environnement culturel. La conservation a longtemps été l'unique moyen d'exposer ce patrimoine. La documentation et les techniques multimédia permettent une immersion réaliste dans un modèle virtuel et multidimensionnel. Le site Monum [MON06] en est une très bonne illustration. De plus, l'industrie culturelle que dénonce Françoise Choay pousse à la représentation virtuelle des « classiques » du patrimoine. [CHO92]

Aloïs Riegl (1903) [RIE84] relève l'intérêt de la documentation dans ses propos notamment pour la valeur historique qui nécessite l'état originel du bâtiment. A son époque, les moyens de documentation ne permettaient pas de restitution précise et complète d'objets autrement que par la reconstruction ou la copie :

« Ainsi serait satisfaite, au moins en partie, l'exigence de la recherche historique, seule source d'un conflit éventuel avec la valeur d'ancienneté, sans que, du point de vue du culte de l'ancienneté, l'original soit dévalorisé par l'intervention de l'homme. »

La photogrammétrie en était à ses balbutiements et en voyait déjà de grands usages. Les techniques d'acquisition permettent aujourd'hui un niveau de documentation qui s'approche du réalisme.

1.4. Conclusion de la première partie

Cette première partie nous a permis de poser le sujet ainsi que les différentes questions qui y sont liées. Après avoir réfléchi sur ce que la notion de combinaison peut impliquer, nous avons émis l'hypothèse de la généralisation de ce terme au-delà de la simple considération des techniques d'acquisition, pour permettre une plus grande fidélité concernant la question de documentation d'ouvrages bâtis. De plus, ce premier volet nous a donné l'occasion de montrer qu'un travail de recherche n'est pas linéaire et dépend du contexte de l'étude. En effet, le laboratoire et la possibilité d'enseigner ont permis d'interagir à plusieurs niveaux et d'apporter une dimension pragmatique qui a enrichi ce travail.

2. Deuxième partie : les techniques d'acquisition 3D

Dans cette partie, nous exposerons les dispositifs d'acquisition tridimensionnelle utilisés pour le relevé architectural à distance. Il s'agit principalement de la photogrammétrie et du balayage optique qui répondent à la contrainte d'un relevé à distance. Nous tenterons de les exposer dans le détail et de les confronter afin de mieux appréhender leurs caractéristiques respectives. Nous envisagerons, en synthèse, que les différences qui existent entre ces deux procédés peuvent conduire à une complémentarité.

2.	Deuxième partie : les techniques d'acquisition 3D	55
2.1.	Photogrammétrie	59
2.1.1.	historique de la photogrammétrie	59
2.1.2.	Géométrie projective sur photographies	61
2.1.3.	Stéréophotogrammétrie	61
2.1.3.1.	Stéréophotogrammétrie analogique	63
2.1.3.2.	Stéréophotogrammétrie analytique	64
2.1.3.3.	Stéréophotogrammétrie numérique	67
2.1.4.	Photogrammétrie numérique	68
2.1.4.1.	Multi image	68
2.1.4.2.	Images rectifiées	69
2.1.4.3.	Ortho-image	70
2.1.5.	Photogrammétrie architecturale	71
2.1.5.1.	définition	71
2.1.5.2.	différenciation entre relevé de terrain et urbain	72
2.1.5.3.	Particularité	73
2.1.5.4.	Restitution	74
2.1.6.	Evolutions de la photogrammétrie	75
2.1.6.1.	photogrammétrie et analyse d'image	75
2.1.6.2.	Auto-calibration	76
2.1.6.3.	orientation automatique	77
2.1.6.4.	Automatisation des processus d'orientation	78
2.2.	Balayage laser	79
2.2.1.	Fonctionnement	79
2.2.1.1.	Laser	79
2.2.1.2.	Mesure à distance	81
2.2.1.3.	Capteur à triangulation	81
2.2.1.4.	Temps de vol	82
2.2.2.	Nuage de point	84
2.2.3.	Post-traitement	85
2.2.3.1.	consolidation	85
2.2.3.2.	Segmentation	87
2.2.3.3.	Modélisation	89
2.2.3.4.	Facettisation	90
2.2.3.5.	Ortho-images	91
2.2.4.	Synthèse relative au balayage optique	91
2.3.	Autres Techniques	93
2.3.1.	Laser ligne	93
2.3.2.	Lumière structurée	93
2.4.	Comparaison entre laser et photogrammétrie	95
2.4.1.	Principe	95
2.4.1.1.	Différences fondamentales	95
2.4.1.2.	Points communs :	95
2.4.1.3.	Exemples	96
2.4.2.	Matériel	99
2.4.2.1.	Portabilité / Flexibilité :	99
2.4.2.2.	Matériel annexe :	100
2.4.2.3.	Prix	100

2.4.3. Processus _____	100
2.4.3.1. Acquisition _____	101
2.4.3.2. Post-traitement _____	102
2.4.4. Données _____	104
2.4.5. Synthèse du comparatif _____	106
2.5. Conclusion sur les techniques d'acquisition _____	107
2.5.1. Complémentarité : _____	107
2.5.2. Le nuage de points comme convergence des types de données de sortie	108

2.1. Photogrammétrie

La photogrammétrie est la première technique d'acquisition 3D à distance. Les principes dont elle s'inspire sont toutefois plus anciens. En effet, Thalès réussit à mesurer la hauteur des pyramides d'Egypte, et ce, grâce aux principes de

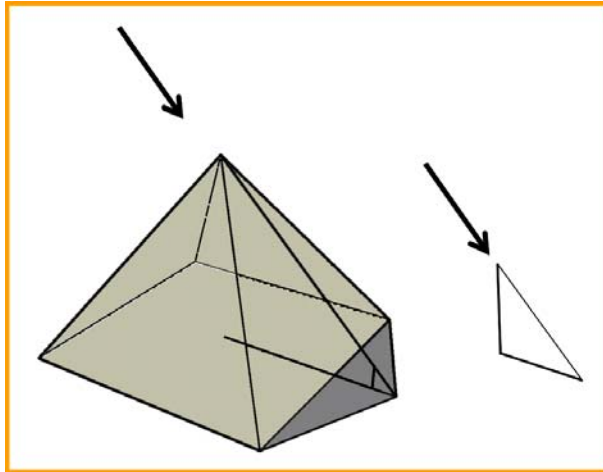


Figure 7 : mesure de la hauteur d'une pyramide à distance par comparaison avec l'ombre d'un objet

proportionnalité dans le triangle (Figure 7). La photogrammétrie hérite du concept de mesure par projection. Le principe est plus complexe que ce dernier, car la relation entre point projeté et point mesuré dépend, par exemple, des dispositifs de focalisation ou d'enregistrement de la projection. Depuis son invention, au milieu du XIX^{ème} siècle, jusqu'à nos jours, les évolutions technologiques liées à la

photographie et aux outils de calcul ont permis un accroissement de l'efficacité de la photogrammétrie. De ce fait, ses utilisations ont changé dans ce même laps de temps.

L'exposé sur la photogrammétrie de fait depuis son apparition jusqu'à nos jours, ce qui permet d'introduire dans un même temps, la notion de mesure et son évolution.

2.1.1. Historique de la photogrammétrie

L'apparition de la photogrammétrie n'est pas en rupture avec les techniques utilisées à l'époque. En effet, elle apparaît grâce à la combinaison de la photographie et de la chambre claire²⁸. La photogrammétrie donne un élément supplémentaire au relevé en comparaison des deux procédés qu'elle combine, à savoir qu'elle contribue à l'élaboration d'une mémoire du relevé. Il est possible de distinguer deux enjeux réunis par les principes de la photogrammétrie : la mesure à distance permise par la géométrie projective et la sauvegarde représentée par la photographie.

²⁸ Chambre claire : dispositif optique qui permet de voir de manière superposée l'objet et la représentation que l'on en fait par une jeu de prisme

Deux personnages charismatiques se sont démarqués dans leur usage de la photogrammétrie, alors à ses débuts, et lui ont fait prendre une importance considérable : Aimée Laussedat et Albrecht Meydenbauer [GRUO4].

Au milieu du XIX^{ème} siècle, Aimé Laussedat (1819-1904) est la première personne à utiliser les propriétés métriques de la photographie. Les principes qu'il utilise sont issus des hypothèses qu'il a formulées à partir de perspectives dessinées. Ces dessins ont d'abord été améliorés par l'usage de la chambre claire et, de manière logique, par l'ajout du principe de la photographie. Sa méthode s'appelle ainsi la "Métrophotographie". Grâce à de multiples relevés, comme, par exemple, au château de Vincennes en 1850 ou au village du Buc en 1861, il développera sa méthode [GRUO4].

Simultanément, en Allemagne, Albrecht Meydenbauer (1834-1921), architecte allemand, est chargé par le gouvernement prussien d'établir le relevé de bâtiments. A cette époque, le relevé s'effectue aux instruments sur site et souvent en contact

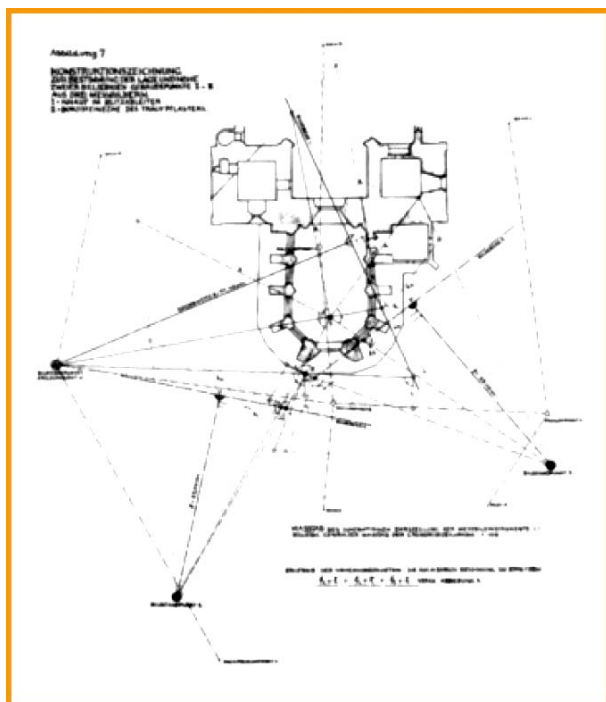


Figure 8 : dispositif de prise de vue de Meydenbauer d'après [ALB01]

avec l'objet. Après avoir évité une chute lors d'un de ses premiers relevés en 1858, il imagine remplacer les mesures directes, causes de multiples soucis d'ordre divers, par des mesures sur photographie. Dès lors il consacre tout son temps libre à cette idée. Dans un premier temps, il émet des hypothèses ; ensuite il développe des appareils qui lui permettent d'effectuer ses premières expérimentations en 1867 (Figure 3). Il démontre l'utilité de la photogrammétrie, qu'il appelle à l'époque la Photométrie, pour le relevé d'ouvrages architecturaux. En

1881, son travail est reconnu par le ministère de la culture et des validations officielles de ses recherches sont, par la suite, effectuées. Dès lors, la photogrammétrie est considérée comme une technique de relevé des ouvrages

architecturaux. Dans ce contexte est créé l'Institut Royal Prussien de Photogrammétrie, dont l'objectif est la documentation du patrimoine culturel de Prusse. Ainsi, jusqu'en 1945, 76000 clichés ont été réalisés.

2.1.2. Géométrie projective sur photographies

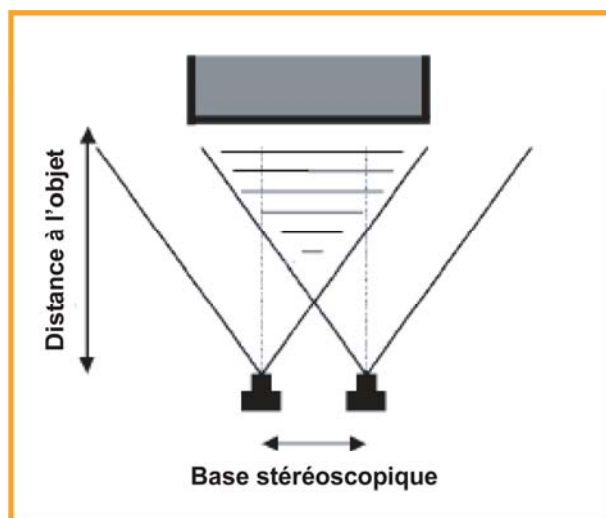
Avant d'utiliser la photographie comme support, les relevés étaient effectués à l'aide d'une planchette topographique²⁹. Le dessin était fait sur place en utilisant les rayons projetés de l'objet ; les angles et dimensions en étaient déduits. Laussedat commença ses recherches sur la perspective en améliorant le principe de la planchette au fur et au fil de ses découvertes. « Les positions de prise de vue étaient déterminées par relèvement spatial. Les clichés étaient orientés sur la planchette et les directions vers les différents objets étaient transférées sur la carte » [BUR05]. Meydenbauer utilisait la géométrie descriptive dans un premier temps en se mettant soit dans des conditions normales au bâtiment, soit dans des positions obliques afin d'augmenter l'effet de perspective. Auguste Chevallier inventa la planchette photographique : le film, placé à l'horizontal, était imprimé par les rayons lumineux réfléchis par un prisme orientable.

2.1.3. Stéréophotogrammétrie

L'utilisation de la photographie pour enregistrer les points de vue de la chambre claire implique une interprétation ultérieure de ces informations. Les principes de la perspective, utilisés pour déterminer les points intéressants, sont chronophages et fastidieux à appliquer. La stéréophotogrammétrie est un procédé qui permet de voir en relief, facilitant de la sorte la saisie de points. Elle utilise la stéréoscopie pour mesurer sur deux clichés directement. Elle se sert cette faculté qu'a le cerveau de fusionner deux images légèrement décalées d'une même scène et d'en percevoir le relief. Charles Wheatstone imagina le premier stéréoscope binoculaire en 1832. À l'origine, il était conçu pour observer des dessins. L'invention du procédé photographique permit la vision en relief de scène existante, fidèle à la réalité. Deux

²⁹ Appelée aussi goniographe : « *Un goniographe est formé d'une planchette fixée sur un trépied, et d'une alidade. L'alidade est composée d'une règle avec un biseau permettant le tracé d'une direction et d'un organe de visée, pouvant être constitué par le système œilleton-crin de l'alidade nivélitrice, ou pouvant être optique ; la lunette comporte alors un réticule, analogue à celui des tachéomètres, ou un tableau focal permettant la mesure des sites et des distances. Sur la planchette est placée la minute quadrillée, sur laquelle sont reportés par leurs coordonnées les points du canevas.* » [HOL04]

clichés, dont les positions de prise de vue respectives sont légèrement décalées, forment un couple stéréoscopique. La distance qui sépare les centres de projection des deux clichés s'appelle la base. Pour permettre au cerveau de reconstituer le relief, il est nécessaire que le couple soit réalisé selon certaines règles. Dans un



premier temps, il faut s'assurer que les axes de prise de vue sont parallèles. Ensuite, il convient de mettre en place un rapport entre la distance à l'objet et la base s'approchant de $1/8^e$. De plus, il faut éviter au maximum une différence d'exposition des clichés, les images ne devant pas pouvoir être différenciées instinctivement. Dans un dernier temps, il est nécessaire de

Figure 9 : base photogrammétrique d'après [GRU02]

maîtriser la zone de recouvrement pour pouvoir voir en relief tout l'objet, car

n'est vu en relief que l'élément qui apparaît sur les deux clichés. Une alternative à la stéréoscopie binoculaire pour la perception du relief est l'anaglyphe. La création d'une scène en relief est beaucoup plus aisée en vision binoculaire qu'en anaglyphe. Le fait que son obtention soit plus complexe que la juxtaposition des deux clichés explique que la stéréoscopie binoculaire fut utilisée par la suite. [CAC04].

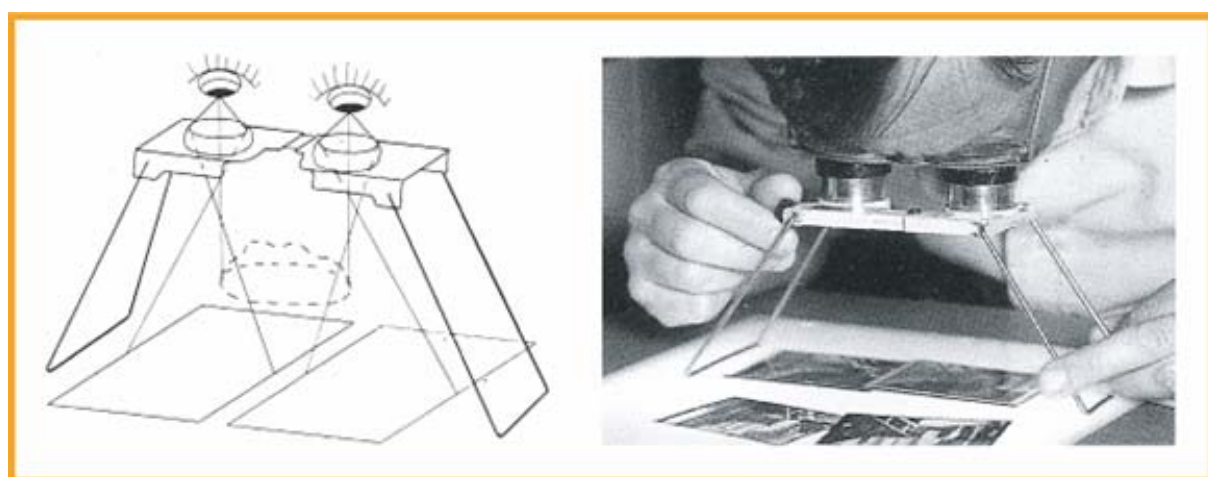


Figure 10 : stéréoscope, principe et application [SAI92]

L'intégration de la stéréoscopie dans les systèmes photogrammétriques intervient au début du XX^{ème} siècle. La stéréophotogrammétrie est divisée en trois catégories

distinctes correspondant directement à trois phases majeures d'évolution : analogique, analytique et numérique.

2.1.3.1. Stéréophotogrammétrie analogique

En 1885, Franz Stolze inventa le principe du repère stéréoscopique. Celui-ci permet la mesure sur des couples de clichés sans avoir à pointer sur chaque image chaque point. Deux points correspondant l'un à l'autre sur chaque cliché sont appelés points homologues [AFT00]. Le premier restituteur des grandeurs réelles d'un objet à partir d'un couple stéréoscopique réellement opérationnel a été construit vers 1905 par Ritter Von Orel. Cet appareil permet de reconstituer les faisceaux perspectifs du couple stéréoscopique. Il est construit sur la base du stéréocomparateur de Carl Pulfrich, datant de 1901. Son principe est basé sur la stricte analogie entre le chemin des rayons lumineux de l'objet jusqu'au support argentique, et les relations

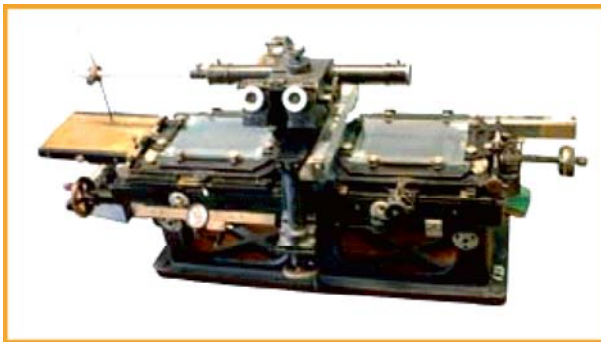


Figure 11 : stéréocomparateur de Carl Pulfrich d'après [GRU04]

mécaniques depuis les clichés jusqu'à l'intersection des tiges représentant les rayons homologues. La mesure du point d'intersection des tiges est assez difficile à effectuer, c'est pourquoi la position de l'intersection est transmise mécaniquement sur un dispositif de traçage sur une stéréominute [AFT00]. L'intersection en trois dimensions est

traduite par une représentation en deux dimensions, la troisième sert à la mise à l'échelle du dessin. L'opérateur dispose de trois dispositifs de positionnement relatifs aux trois axes X, Y et Z, ce qui lui permet de dessiner les contours des objets directement. Cette possibilité est une amélioration par rapport à la mesure ponctuelle : elle permet une interpolation constante. Le restituteur apporte un progrès à la mesure, puisqu'on mesure l'objet à distance mais la représentation impose la perte d'une dimension : la mesure de l'objet se fait en trois dimensions, mais sa représentation est en plan.

La stéréorestoration analogique annonce la fin de la géométrie projective laborieuse en introduisant l'automatisme qui ne cessera d'augmenter. L'évolution de la

photogrammétrie ne dépend pas uniquement de celle des appareils de restitution, elle est aussi étroitement liée à celle des chambres de prise de vue.

2.1.3.2. Stéréophotogrammétrie analytique

La photogrammétrie analytique correspond à l'introduction de calculs correctifs permettant d'obtenir des résultats prenant en compte l'imperfection des outils employés à la prise de vue et à la saisie des points d'appuis. Ces défauts sont souvent liés à des phénomènes non linéaires et ne pouvant être résolus par un système analogique. La photogrammétrie analytique est apparue avec Sebastian Finsterwalder en 1899. Il mit en place une méthode d'orientation relative et absolue à base de mesures redondantes qui utilisaient une résolution par la méthode des moindres carrés. En 1924, Otto von Gruber dériva les équations de projection qui établissent la relation entre les points homologues de l'image et le point 3D correspondant. Les six points nécessaires à la suppression de la parallaxe pendant l'orientation relative portent toujours son nom. Tout au long de la première moitié du XX^{ème} siècle, une théorisation de la photogrammétrie enrichit les moyens de correction des images, d'orientation des couples stéréoscopiques et de mesure photogrammétrique, mais seule l'apparition de l'informatique dans les années 1960 contribue à la naissance du premier restituteur analytique. L'ordinateur devient l'intermédiaire entre les clichés et la mesure 3D de l'objet sous l'action de l'opérateur. Chaque cliché du couple est disposé sur un chariot, appelé aussi porte-cliché, piloté automatiquement en fonction des saisies de l'opérateur. Les chariots sont indépendant mécaniquement l'un de l'autre. Leur position relative est déterminée mathématiquement en fonction de réglages propres à chaque couple stéréoscopique. La photogrammétrie analytique va mettre en évidence les trois étapes d'orientation comme une méthodologie de mise en place de la restitution [VIE96].

Au commencement, l'orientation interne doit être réalisée. Cette phase permet de prendre en compte les défauts de l'appareil de prise de vue et le recalage du cliché dans les conditions originales de projection. Pour rendre possible cette étape, sont intégrés dans la chambre même, des repères de fond de chambre dont on connaît la position très précisément. Au moment de la prise de vue, les repères sont photographiés en même temps que la scène. Les optiques employées déforment

l'image projetée ; le plan de projection, que ce soit un film argentique ou un capteur numérique, ne correspond pas toujours à la surface idéale³⁰ qu'on lui attribue. La calibration de l'appareil permet d'établir un modèle théorique de la déformation que subit la projection des rayons lumineux. L'orientation interne correspond à la prise en compte permanente de ces paramètres de déformation. Le modèle établi par la calibration de l'appareil a ses limites, ce qui implique que la qualité de la chambre de prise de vue influe directement sur la performance de l'orientation absolue.



Figure 12 : repères de fond de chambre imprimés sur la photographie lors de la prise de vue

Ensuite l'orientation relative est effectuée. Les mesures pointées sur l'image sont rendues fidèlement par l'orientation interne. Il s'agit dès lors de mettre en correspondance les points homologues. Cette étape est aussi mentionnée comme la phase de suppression de la parallaxe [VIE96]. Dans un cas, comme ici la stéréophotogrammétrie, où les clichés sont pris dans une configuration normale au plan moyen de l'objet, il est nécessaire de réduire au minimum l'angle formé par les axes optiques des deux prises de vues, car cette configuration fait partie de l'hypothèse liée à la stéréoscopie. Pour chaque point visible sur les deux images du

³⁰ qui serait dans ce cas précis un plan

couple stéréoscopique correspond un point en 3D dans l'espace réel et dans l'espace image. L'orientation relative, par la sélection d'au moins six points homologues, met en place le modèle stéréoscopique. À la fin de cette opération, l'opérateur voit le relief et peut déjà mesurer l'objet considéré.

C'est à la fin que l'on établit l'orientation absolue : la dernière phase d'orientation est une mise à l'échelle du modèle stéréoscopique par rapport à l'objet réel. Dans cette perspective, il faut introduire au minimum trois points d'appuis dans le modèle, mesurés sur l'objet. La mesure stéréoscopique permet ainsi d'affecter des coordonnées réelles à tout point visible sur le couple de clichés.

L'utilisation d'outils mathématiques tels que la méthode de compensation par les moindres carrés permet d'avoir des observations redondantes. Pendant l'orientation externe -phase regroupant orientation relative et absolue par opposition à orientation interne-, un nombre minimum de points est fixé directement par la résolution



Figure 13 : stéréorestituteur analytique Zeiss Planicomp P33 D'après [IEN02]

mathématique des équations de projection. On préconise ainsi un minimum de 15 à 20 points pour l'orientation relative. En ce qui concerne l'orientation absolue, le nombre de points surnuméraires, c'est-à-dire au-delà de trois, dépend directement de la facilité à mesurer les points d'appuis sur l'objet. La photogrammétrie étant un outil qui permet d'éviter la mesure directe, il est souhaitable d'en mesurer

le moins possible. La méthode de prise de vue photogrammétrique de l'inventaire général en recommande cinq pour la possibilité de contrôle [SAI92]. L'introduction de l'informatique dans la restitution photogrammétrique apporte aussi la capacité de stockage de l'information 3D produite indépendamment de la représentation qui en sera faite³¹. Toute mesure est enregistrée en trois dimensions dans un fichier vecteur. Les informations visibles à l'écran sont contrôlables comme elles l'étaient auparavant avec le traceur piloté par le restituteur analogique. Le stockage

³¹ On n'a plus besoin de stéréominute.

numérique des mesures permet d'introduire une division entre modèle dimensionnel et représentation.

2.1.3.3. Stéréophotogrammétrie numérique

La photogrammétrie numérique correspond à une informatisation avancée de la photogrammétrie analytique. L'appareil de restitution laisse la place au logiciel. La photogrammétrie numérique, par cette évolution permet de réduire le prix des reconstituteurs qui avait atteint des sommets avec la technologie analytique. L'aspect numérique allie donc performances, toujours plus grandes, et prix abordables. Seul le système de stéréoscopie permet de différencier l'ordinateur utilisé d'un ordinateur classique. L'affichage peut se faire à l'aide de lunettes polarisées et un écran qui affiche alternativement l'image de droite puis l'image de gauche de façon synchronisée avec les lunettes. L'anaglyphe, grâce aux traitements numériques, peut être généré automatiquement et trouve son intérêt, car seules des lunettes avec filtre de couleurs complémentaires, telles que rouge et cyan sont nécessaires.

Les données sont numériques, mais elles peuvent être de nature différente. Assurément on traite des images numériques [VIE96]. Dans les chambres de prise de vue numérique le film sur lequel était projeté l'image de l'objet réel est remplacé par un capteur électronique sensible à la lumière. Le signal est directement converti en un fichier numérique exploitable sans l'intermédiaire de traitement, tel que le développement. Chaque valeur du pixel est enregistrée, ce qui rend le traitement de l'image très puissant. Ce dernier permet de voir des objets considérés comme invisibles avec des clichés argentiques, tels ceux situés dans des zones d'ombre, par exemple. Les clichés argentiques sont toujours utilisables car ils peuvent être numérisés parce qu'ils ont une résolution plus importante que celles des images numériques ; c'est pourquoi on les utilise très couramment. De plus, les chambres de prise de vue argentique sont le fruit de plus d'un siècle de recherche et de production, ce qui en fait des produits très performants. Les clichés sont numérisés dans des scanners à très haute résolution, de l'ordre de 3 μm , pour pouvoir être utilisés dans les systèmes numériques.

L'intégration de l'informatique dans les procédés de mesure photogramétrique implique la possibilité d'automatiser de plus en plus d'étapes du processus.

L'automatisation vise à réduire l'intervention de l'opérateur et à accélérer ainsi la production. L'opérateur garde une fonction primordiale, à savoir celle du contrôle de l'information produite. Les développements en analyse d'image permettent en appliquant des traitements spécifiques d'obtenir automatiquement des points homologues ; c'est ce que l'on appelle la corrélation automatique. Le système balaye méthodiquement chaque image en comparant des zones pour ainsi déterminer les points correspondants. La corrélation automatique peut être appliquée à plusieurs phases de l'orientation. Pendant l'orientation interne, la recherche des repères de fond de chambre, en fonction de leur position théorique définie par le fichier de calibration est désormais effectuée automatiquement. La gestion de bande complète d'images, soit la juxtaposition de plusieurs couples stéréoscopiques, augmente la complexité de l'orientation relative. La corrélation automatique permet ainsi d'orienter des bandes complètes en aérotriangulation toujours en réduisant l'intervention de l'opérateur. La qualité de la mesure est vérifiée par un facteur de corrélation.

2.1.4. Photogrammétrie numérique

L'évolution de la photogrammétrie vers les technologies numériques ouvre d'autres horizons en ce qui concerne la mesure à partir d'images. La stéréophotogrammétrie numérique a été abordée comme évolution de la stéréophotogrammétrie, mais les applications numériques de la photogrammétrie ne se limitent pas à cette discipline.

2.1.4.1. Multi image

L'utilisation de la photogrammétrie multi-image n'est possible que depuis que les capacités de calcul informatique l'ont permise car, contrairement au cas normal de la stéréophotogrammétrie, les points de vue des images sont aléatoires et ne peuvent dans ce cas pas suivre un modèle physique³².

La photogrammétrie multi-image est une alternative à la stéréophotogrammétrie. Les images qu'elle intègre sont prises d'une autre façon. Ceci est directement lié à la méthode d'ajustement par les faisceaux qui est utilisée pour orienter les images entre elles. Les prises de vues doivent converger vers l'objet et avoir une grande surface de recouvrement, le minimum acceptable étant 60%. Le résultat obtenu est un bloc d'image, où la position relative de chaque image est exprimée en fonction de

³² cf. Photogrammétrie analogique et analytique §2.1.3.1 et §2.1.3.2

l'image voisine. Chaque point visible sur plusieurs images peut être déterminé en trois dimensions. La photogrammétrie multi-image est une technique entièrement accessible de façon logicielle, hormis l'appareil de prise de vue. Cette

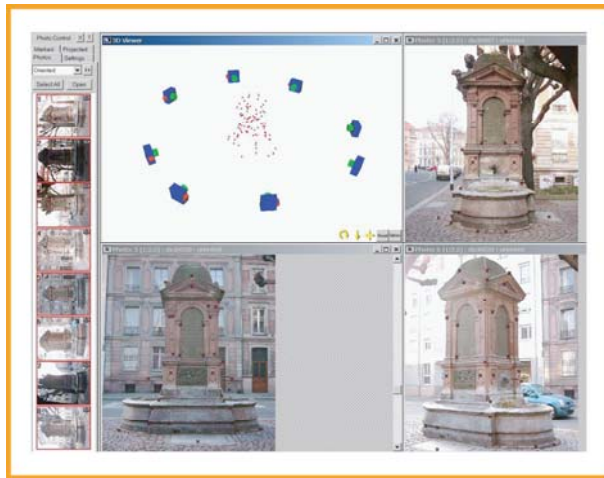


Figure 14 : interface de Photomodeler

caractéristique, qui s'ajoute au fait que les prises de vues sont moins restrictives que pour la stéréophotogrammétrie, donne un aspect populaire à la mesure sur image et favorise son utilisation par un large public. La figure 14 montre l'interface du logiciel Photomodeler [PHO06]. Les prises de vues convergent et permettent d'obtenir un semis de points tridimensionnel de l'objet. Le principe

d'acquisition est performant mais entièrement manuel. En effet tous les points doivent être pointés sur au moins trois images pour permettre la détermination des ses coordonnées en trois dimensions.

2.1.4.2. Images rectifiées

La photographie fournit des informations bidimensionnelles. Tout objet contenu dans un plan peut ainsi être mesuré directement sur une photographie. Pour cela, il est nécessaire de corriger les effets de la perspective, causés par la projection centrale de l'appareil de prise de vue, une vue en plan étant faite selon une projection orthogonale.

L'usage de la photographie rectifiée est limité par la planéité des objets. Seuls les faibles reliefs sont tolérables, car ils participent à l'imprécision de la mesure. Lors du cliché, il est conseillé de prendre l'image avec une direction de prise de vue la plus perpendiculaire possible à l'objet. De plus, les déformations dues aux distorsions de la focale étant corrigées par un modèle, il est préférable de n'utiliser que la partie centrale de l'image pour que la correction soit la plus efficace. Seuls quatre points d'appuis sont nécessaires à la rectification d'une image.

La rectification d'image était déjà possible avec la photographie argentique [BUR05]. Au moment du développement, on donnait un angle entre le projecteur et le papier. On pouvait ensuite mesurer directement sur le document, s'il était mis à une échelle précise. L'intégration numérique de la rectification d'image permet de prendre en compte les déformations de la chambre de prise de vue.

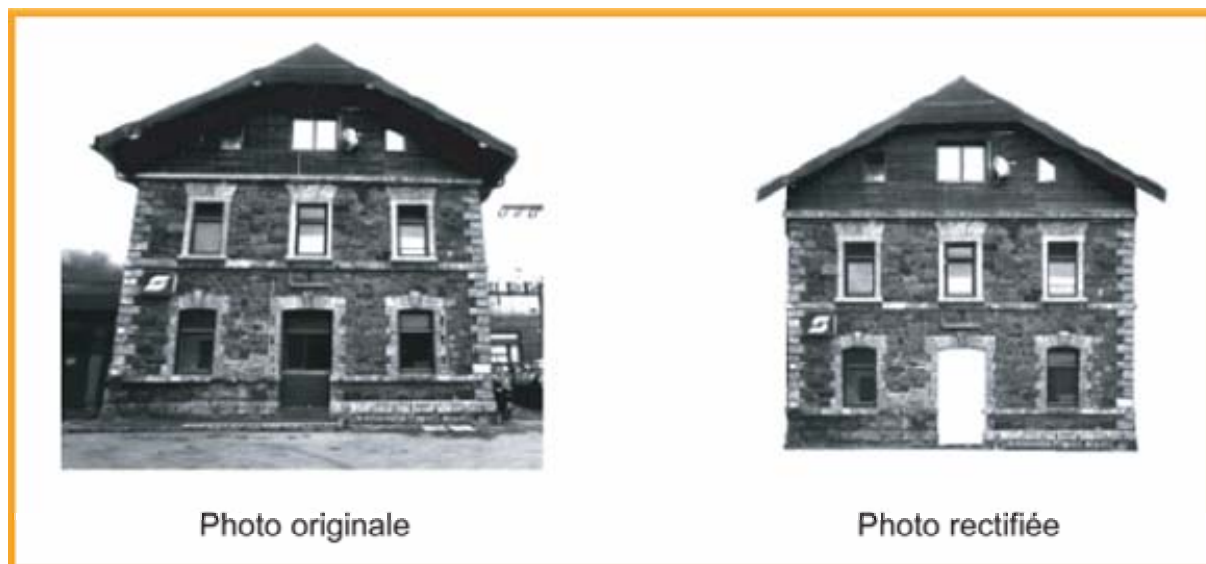


Figure 15 : photo rectifiée d'après [GRU02]

2.1.4.3. Ortho-image

L'ortho-image ou ortho-photo est directement un produit des technologies numériques. C'est le résultat de la projection orthogonale d'un modèle de surface non-plane drapée de la photographie qui a été faite de l'objet. L'ortho-image est ainsi composée de plusieurs morceaux d'images correspondant chacune à une projection différente. L'ortho-image correspond à une vue orthogonale de l'objet selon une direction de projection. Elle permet donc la mesure en grandeur réelle de tous les objets situés dans des plans parallèles au plan de projection. On peut assimiler une ortho-image d'une façade à une élévation pour ce qui concerne la relation aux dimensions. La photographie étant moins limitée quant au niveau de détail si on la compare au dessin, tout ce qui est visible sur l'image est exploitable alors que tout ce qui intéresse la représentation doit être dessiné pour l'élévation. Si l'on confronte l'ortho-image à l'image rectifiée, on peut la comparer à une mosaïque de plusieurs images rectifiées en fonction de tous les plans correspondant à l'objet. La fabrication d'ortho-photo nécessite un nombre conséquent d'images, car il faut voir tous les

plans constituant la partie visible de l'objet, et ce dans une orientation la plus favorable. [AND05]. L'ortho-image est également avide de points d'appuis : il faut, en théorie au moins trois points par portion plane, ce qui représente une quantité importante de points à mesurer³³.

2.1.5. Photogrammétrie architecturale

Après avoir décrit les principes techniques essentiels de la photogrammétrie, nous allons nous placer dans le cadre de la pratique de la photogrammétrie architecturale. Dans cette perspective, il faut tout d'abord distinguer la photogrammétrie rapprochée de la photogrammétrie aérienne. Cette considération est liée aux différentes échelles d'intervention relative à chacune des deux catégories. La photogrammétrie a eu connu un grand essor grâce aux débouchés militaires puisqu'elle permet d'établir des cartes. C'est donc la photogrammétrie aérienne et les usages topographiques moins que l'usage architectural qui sont à l'origine de son développement.

2.1.5.1. définition

On utilise couramment le terme photogrammétrie architecturale pour distinguer cette pratique de la photogrammétrie aérienne. On a établi cette convention à une époque où la photogrammétrie aérienne était la plus répandue [CAR68]. Le passage de l'une à l'autre implique plusieurs modifications dans les principes, méthodes et techniques comme en témoigne le vocabulaire employé. L'étude des variations du champ sémantique relatif à la juxtaposition des deux usages permet la différenciation. Pour cela, on distingue trois catégories de termes utilisés, qui peuvent être décrites par des couples d'antagonisme.

Le premier se situe au niveau des conditions de photographie : comment se positionne l'action de prise de vue par rapport à l'objet ? Le domaine du réel visible étant mono orienté, le couple Aérien / Terrestre s'impose. La seconde paire antinomique est relative à un point de vue théorique induisant des techniques différentes en fonction du mode pratiqué : Rapproché / à distance. La troisième paire est à mettre en rapport avec l'objectif du relevé. Il peut englober d'autres éléments. Traditionnellement, on distingue deux types d'application en photogrammétrie, à savoir architecturale / cartographique, auquel on peut ajouter l'archéologie. C'est le

³³ La quantité de points à mesurer est proportionnelle au nombre de plans dont est faite l'ortho-image.

groupe ouvert par nature, car les applications de la photogrammétrie sont encore en cours d'évolution. Les trois catégories évoquées ci-dessus ne sont pas des couples fermés, nous les exposons ici par deux pour faciliter la qualification de la photogrammétrie architecturale par rapport à l'aérienne.

La discussion a posteriori de l'emploi justifié ou non de ce terme n'a d'intérêt ici que pour son emploi tout au long de notre travail. Il ne s'agit pas de justifier ni de valider son usage, mais bien de définir son existence et d'instaurer son utilisation dans ce travail de recherche. Commençons d'abord par le terme photogrammétrie qui est un néologisme, issu de trois mots grecs: « *photos* » qui signifie la lumière, « *gramma* » qui se réfère à quelque chose d'écrit ou dessiné et « *metron* » qui correspond au mot mesure [ALB01]. Le néologisme permet d'éviter toute ambiguïté sur les emprunts et sur le sens, un mot étant vierge de toute utilisation préalable. L'association de ce terme à l'adjectif architectural est plus lourde de conséquence. L'utilisation de l'adjectif « architectural » accolé au terme de « photogrammétrie », comme on a pu l'entrevoir précédemment, définit essentiellement l'échelle. Cependant, les objets concernés par ces deux applications sont différenciables.

Pour positionner la photogrammétrie architecturale, nous utilisons la définition que donne Stéphane Hanrot de l'architecture [HAN02]. Ce travail est basé sur les définitions de l'architecture livrées par un échantillon d'architectes théoriciens choisis sur une période allant du premier siècle avant Jésus-Christ jusqu'au XX^{ème} siècle. La définition de l'architecture, qui se rapproche le plus étroitement du sens que nous entendons aujourd'hui, est celle de Vitruve³⁴. Le mot architecture est polysémique. En effet, on peut en tirer trois sens majeurs qui se recoupent : l'architecture comme phénomène observable (l'objet architectural), l'architecture comme pratique et l'architecture comme savoir. La photogrammétrie architecturale se voit donc définie comme le relevé d'objets architecturaux par les principes photogrammétriques.

2.1.5.2. différenciation entre relevé de terrain et urbain

Nous allons aborder la particularité de la photogrammétrie architecturale vis-à-vis de la photogrammétrie « cartographique » dans le paragraphe suivant. Néanmoins, afin

³⁴ Vitruve (I^{er} av J.-C.) : Ingénieur militaire auteur de « De architectura », seul traité complet des techniques architecturales grecques et latines. De par cette particularité, il a longtemps servi de référence malgré les incohérences qui y ont été relevées [ALB1553] [GRO85]. Sa définition est celle qui reprend le plus la tendance polysémique du terme architecture [HAN02]

de mieux l'introduire, nous allons mettre en valeur les particularités du relevé aérien urbain d'un relevé de terrain sans agglomération de bâtiment.

La photogrammétrie aérienne permet de mesurer des ouvrages bâtis en zone urbaine. Malgré la précision de l'ordre de 15 cm, ce qui est faible comparé aux besoins architecturaux, son utilisation ne doit pas être négligée car le point de vue aérien offre une vision globale de l'ouvrage qu'il est difficile d'obtenir autrement que par de multiples recoupements des données terrestres. La problématique du relevé urbain par rapport à un relevé de terrain non bâti prend son sens dans le résultat qui dépend du rapport aux bâtiments en plus des autres obstacles courants, tel qu'un arbre. Lorsque l'on veut obtenir le relevé du terrain, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) [AFT00], et que l'on a spécifié un pas³⁵ de mesure, on doit s'assurer de ne pas mesurer autre chose que le sol. Dans des tissus urbains denses, cette tâche est parfois très difficile à réaliser, d'autant plus si le point à mesurer se trouve éloigné du centre de l'image : le dévers diminue la chance de voir la chaussée d'un canyon étroit. Le MNT n'est pas suffisant pour qualifier les caractéristiques urbaines, c'est pour cette raison qu'on élabore des Modèles Numériques d'Élévation (MNE) [AFT00]. Celui-ci correspond à la représentation des bâtiments. Il s'agit, le plus souvent, de relever les toitures des ouvrages et d'en projeter les bordures sur le MNT.

2.1.5.3. Particularité

La photogrammétrie architecturale se caractérise par la petite échelle de mesure, si on la compare à la photogrammétrie aérienne, d'une part, et d'autre part, à l'objet à mesurer. La définition d'un bâtiment par la mesure est liée à l'interprétation qu'il est possible d'en faire. Cette particularité est déjà présente lors du relevé de toiture en photogrammétrie aérienne ; le phénomène s'accroît quand on s'en rapproche. La mesure photogrammétrique, aussi bien en stéréophotogrammétrie qu'en photogrammétrie multi-image, est sujette au choix du point à mesurer. L'opérateur va positionner les points un à un en fonction de ses critères propres. De plus, les mesures effectuées sur les parties extérieures de l'ouvrage doivent être synthétisées en un document qui soit une représentation comparable à celle établie au moment de la construction de l'édifice. Cette opération de mesure d'investigation, guidée par

³⁵ Distance entre chaque mesure correspondant à une grille.

les contraintes de la représentation et donc du sens, est regroupée sous le terme « restitution ».

2.1.5.4. Restitution

La restitution photogrammétrique doit être distinguée de la restitution archéologique d'autant plus que ce sont des domaines qui peuvent être très proches. L'action «restituer » peut se décrire par «*reconstituer, rétablir à l'aide de fragments subsistants, de déductions, de documents* » ou par « *Reproduire fidèlement (un son, une image).*» [ROB01].

La restitution en photogrammétrie est associée aux appareils de mesure, appelés restituteurs [SAI04]. Elle correspond, donc, à la deuxième définition, citée ci-dessus. La restitution est ainsi la reproduction fidèle de l'objet pas la mesure. La première définition correspond, en fait, à la pratique archéologique [PER93], [GOL06]

Il est essentiel d'évoquer la restitution d'ouvrage architectural, car celle-ci peut parfois aider à déceler des dysfonctionnements qui alimentent notre étude.

La confrontation entre le bâtiment et la représentation, produit de la restitution, provoque des estimations u'il est intéressant de souligner. En effet, pour restituer on utilise la géométrie³⁶. Nous avons ainsi deux types de points : d'une part le point comme élément géométrique délimitant une droite ou un sommet d'une surface, et d'autre part le point mesuré issu du pointé, la relation entre l'objet réel et la représentation. La tentation, voire le geste implicite, est de confondre les deux types de points. Or, de cette fusion naît l'estimation qui relève de l'interprétation. Il n'est pas ici question de remettre en cause la nécessité d'interpréter pour représenter mais de souligner que ce problème implique une double formation nécessaire du restituteur : il doit, tout d'abord, maîtriser le pointé stéréoscopique, mais également une bonne connaissance architecturale. La maîtrise du pointé stéréoscopique va de soit. Quant à la nécessité de maîtriser les connaissances architecturales, elle s'explique par le fait que le restituteur a le choix du pointé. La représentation demandée est motivée par un besoin. La représentation doit être appropriée à ce besoin. En fonction de la précision de la représentation demandée, certaines arêtes

³⁶ Si l'on considère acquis que l'on travaille dans un environnement numérique

doivent ou non être représentées. Ce choix se détermine par une connaissance de l'ouvrage à restituer.

2.1.6. Evolutions de la photogrammétrie

L'aspect répétitif des tâches à accomplir par l'opérateur laisse supposer que l'automatisation en photogrammétrie améliore les temps de restitution.

2.1.6.1. photogrammétrie et analyse d'image

La photogrammétrie est une technologie mature [BAL99] et [BER04] : les évolutions qu'elle a subies durant plus d'un siècle font d'elle une technique de précision. Comme on l'a vu précédemment³⁷, il faut choisir les points à mesurer pour créer la représentation au fur et à mesure, et ce, aussi bien en stéréo restitution qu'en utilisant la photogrammétrie multi-image. La télédétection, par l'approche objet, permet de donner du sens à partir des images. L'utilisation de l'analyse d'images permet, en premier lieu, l'automatisation de processus, tels que les orientations internes et relatives en photogrammétrie aérienne [GRU02]. De plus, les systèmes numériques permettent la création de MNT presque automatiquement. L'intervention de l'opérateur, en dehors du contrôle des données produites, consiste à déterminer les lignes de rupture de la zone à restituer, c'est-à-dire d'indiquer les discontinuités du relief [KLT06].

L'application de ces solutions en photogrammétrie architecturale paraît encore inaccessible, la multitude de ruptures empêcherait une bonne corrélation. De plus, la restitution de toutes les ruptures correspondrait à tout faire. Les caractéristiques de prise de vue des méthodes stéréoscopiques permettent d'appliquer des principes d'automatisation plus facilement qu'en multi-image, technique la plus prometteuse en ce qui concerne la photogrammétrie architecturale. En effet, les algorithmes d'orientation en condition multi image sont beaucoup plus complexes, dans la mesure où, pour permettre les calculs, de nombreuses valeurs approchées sont nécessaires. L'altitude variant peu et les directions de prise de vue étant considérées comme très proches de la verticale sont des hypothèses que l'on ne retrouve pas en multi-image. L'analyse d'image par corrélation de zones d'images semblables, utilisée en photogrammétrie aérienne, est donc difficilement réutilisable.

³⁷ Cf. §2.1.3

L'automatisation de la photogrammétrie multi-image se concentre vers l'utilisation des principes de la perspective. En effet, la régularité de la géométrie d'un ouvrage permet d'orienter l'analyse d'image dans cette direction. De plus, l'utilisation facilitée des appareils de prise de vue du commerce permet une démocratisation de cette technique de relevé. Les recherches d'auto-calibration permettent l'utilisation d'appareils quelconques, dont on ne connaît pas les caractéristiques.

2.1.6.2. Auto-calibration

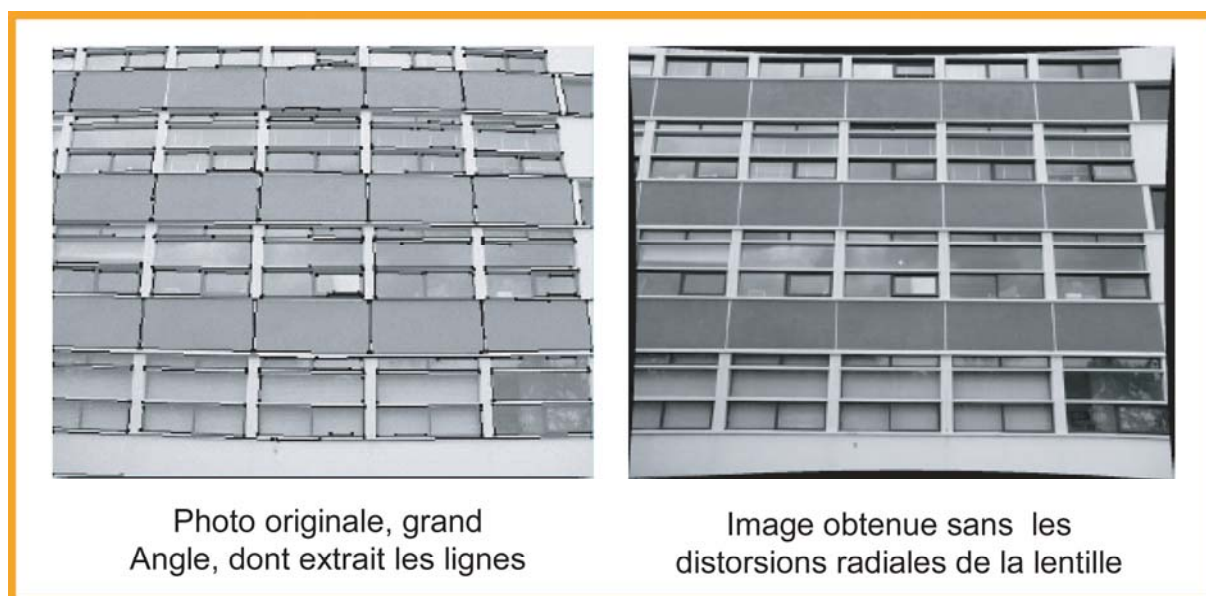


Figure 16 : orientation automatique par reconnaissance de lignes d'après [HEU99]

La calibration correspond à la mesure des déformations optiques ayant une influence sur les images saisies. Il est nécessaire, pour la réaliser, de prendre des photos d'une mire spécifique avec l'appareil. Or, un appareil qui possède un objectif à focale variable doit être calibré pour toutes les longueurs focales utilisées pour les prises de vue. Par conséquent, les deux seules positions utilisables sont le grand angle ou la longueur focale maximum, l'appareil l'objectif étant ainsi en butée et ces deux focales sont donc recouvrables avec quasi certitude. L'intérêt de prises de vue sans calibration nécessaire se conçoit aisément : l'utilisateur pourrait prendre les images avec la longueur focale la plus adaptée aux conditions du site. De plus, il est envisageable d'utiliser des images prises de l'objet concerné sans en connaître les caractéristiques.

L'auto-calibration peut être réalisée par reconnaissance de forme en analysant l'image. Les ouvrages architecturaux photographiés peuvent fournir des formes aisément reconnaissables, telles que les angles entre les plans de façades et de toitures. Les lignes résultantes sont repérées et comparées à la forme qu'elles devraient avoir et l'on peut ainsi déterminer les paramètres de l'appareil de prise de vue [Heu99].

2.1.6.3. orientation automatique

L'automatisation de l'orientation peut se voir sous différents angles : soit on s'intéresse au cas de figure théorique et la recherche s'oriente vers l'orientation d'images existantes sans intervention possible sur les modes de prise de vue, soit on admet pouvoir intervenir sur le relevé et ainsi simplifier la tâche d'automatisation de l'orientation.

L'orientation d'images, sans intervention sur le mode d'acquisition, impose de reconnaître des éléments sur les images qui rendent possible cette opération. La détection des points de fuite permet d'aborder un premier volet de l'orientation qui se base sur les principes perspectifs pour retrouver certaines caractéristiques de l'orientation de la prise de vue par rapport à l'objet figurant sur les images. De plus, en appliquant des algorithmes de détection de lignes, des motifs composés de plusieurs lignes peuvent être comparés entre les images à orienter. Les zones semblables sont associées entre images et l'orientation relative est réalisée. L'orientation obtenue dans ce cas demeure semi-automatique. [HEU02]

Si l'on considère une autre démarche, dans laquelle on s'autorise à influencer sur la démarche de prise de vue, les hypothèses diffèrent quant aux processus à mettre en œuvre pour orienter les images automatiquement. Les images sont réalisées avec un fort recouvrement, ce qui permet d'obtenir de grandes zones entre deux images successives. Ainsi, on peut comparer les pixels et retrouver des zones communes aux deux images. Une fois l'association réalisée, les images peuvent être orientées. [POL00]

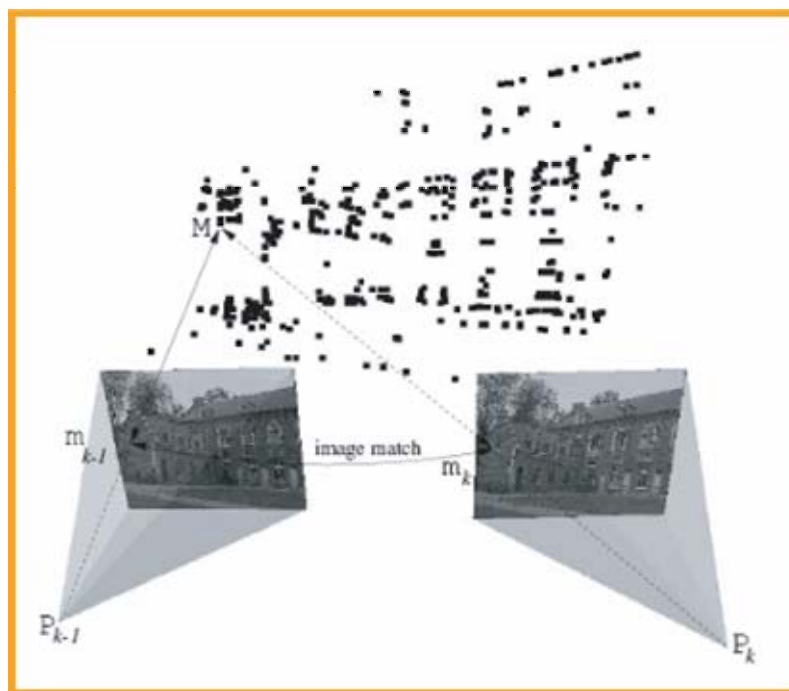


Figure 17 : orientation automatique par association de zones communes d'après [POL00]

2.1.6.4. Automatisation des processus d'orientation

La calibration et l'orientation sont des phases qui, une fois automatisées, rendent les post-traitements de la photogrammétrie beaucoup moins longs. Dès lors, le temps principal peut être consacré à la restitution. Nous avons vu dans les deux précédents chapitres³⁸ que chacune des deux étapes, à savoir la calibration et l'orientation relative, pouvait être réalisée automatiquement. Une fois obtenue séparément, il devient nécessaire, et ce de manière logique, de regrouper ces deux processus en un seul [HEU03]. Certains résultats obtenus pour une étape peuvent être réutilisés pour une autre ; l'association des deux processus permet alors une optimisation des calculs. L'étude [HEU03] n'est pas complètement automatique, mais tend à le devenir, la complexité du traitement des images, qui n'ont pas été réalisées pour l'étude, rendant la tâche plus difficile.

³⁸ Cf. §2.1.6.2 et §2.1.6.3

2.2. Balayage laser

Après avoir exposé l'évolution et les utilisations de la photogrammétrie, nous nous intéressons à l'autre technique majeure d'acquisition, le balayage optique. Nous nous intéresserons à son fonctionnement ainsi qu'aux données produites et aux moyens de les obtenir.

2.2.1. Fonctionnement

Les dispositifs à balayage optique fonctionnent avec une source de lumière au laser. Ce principe peut être décliné de plusieurs façon que nous allons décrire.

2.2.1.1. Laser

En 1960, le physicien américain Théodore Maiman obtient pour la première fois une émission laser. Le terme « Laser » est l'acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, traduit par amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement en français. Les lasers sont des sources nouvelles de rayonnement, mettant en œuvre une technique spéciale d'émission, dite « stimulée », par opposition à celle des sources usuelles de lumière, qui est « spontanée » [FLE04]. C'est la raison pour laquelle le principe du laser induit la qualification des applications qui sollicitent son utilisation comme des systèmes actifs. Le laser se caractérise principalement par le fait qu'il se propage sous la forme d'une onde. Par conséquent, il est possible de décrire sa propagation grâce à la fréquence et à la longueur d'onde. La qualité essentielle que l'on trouve au laser est la structure cohérente du faisceau de lumière produit. Cela donne au rayon lumineux produit une grande intensité malgré une puissance réelle peu importante. La relation qui lie l'intensité d'un rayon laser à sa puissance par rapport à la surface de son faisceau s'exprime ainsi :

$$I = P / S$$

I= Intensité du faisceau
P= Puissance de la source
S = Surface du point lumineux

La cohérence spatiale et temporelle permet donc de minimiser la surface sur une très grande distance et ainsi d'obtenir une forte intensité malgré une faible puissance du signal.

L'objectif du laser est de créer un rayonnement de lumière structuré. Pour cela, on excite des atomes afin qu'ils émettent des photons, un atome émettant un photon lorsqu'il change de niveau d'énergie. L'émission du photon est destinée à restituer l'état initial de l'atome. Celui-ci reçoit de l'énergie qu'il restitue sous forme d'un photon. Les atomes composent le matériau amplificateur du système laser. L'énergie apportée peut être sous forme optique ou électrique. Cet apport extérieur d'énergie est appelé le « pompage » [FLE04]. Les photons produits doivent être organisés pour obtenir le rayonnement laser. La canalisation des photons est obtenue par la mise en place d'une « cavité raisonnante » composée de deux miroirs disposés face à face. Les photons sont ainsi dirigés, au fur et à mesure de leur émission dans la direction de l'axe créé par la mise à distance des miroirs. Un des deux miroirs n'est pas complètement opaque ; il permet au rayon laser ainsi obtenu de sortir de la cavité. On peut finalement décomposer le principe du laser en trois éléments : un milieu composé d'atomes spécifiques, une source d'énergie pour les exciter et un système d'orientation des photons produits.

Il existe différents types de laser organisés en fonction des atomes employés comme matériau amplificateur. On peut distinguer les lasers solides, des lasers à gaz ainsi que des lasers à liquides et à colorants pour les plus répandus.

Les applications du laser sont très nombreuses et ce dans un grand nombre de domaines. Le laser est utilisé en optique : il permet de réaliser des études sur la diffusion et la diffraction. Il est également employé pour effectuer des mesures, et ce de multiples manières. La fusion nucléaire est aussi réalisée par l'emploi du laser. On peut encore citer des méthodes de guidage au laser, mais aussi d'éclairage. On trouve des applications aux lasers en médecine ainsi qu'en biologie. Les emplois en télécommunication, notamment avec le déploiement des fibres optiques, induisent directement de nombreuses applications domestiques.

Dans l'exposé en cours, nous ne nous arrêterons que sur l'utilisation du laser pour la mesure.

2.2.1.2. Mesure à distance

La mesure à distance consiste à émettre vers l'objet à mesurer une impulsion lumineuse très courte. Le rayon frappe l'objet et une partie de la lumière est diffusée par l'objet. C'est cette part de lumière qui revient vers le point d'émission où elle est captée et interprétée. La distance entre le système et l'objet rencontré est obtenue par la relation :

$$d = t \cdot c / 2$$

c = vitesse de l'onde
d = distance
t = temps entre l'émission et écho

Le dispositif de mesure à distance par émission/réception de laser est appelé Lidar, *light detection and ranging*, en référence à l'acronyme radar, *radio detection and ranging*. Le lidar exploite la cohérence du laser sous deux aspects : la faible dispersion du rayon permet d'agir sur de longues distances et le point lumineux sur l'objet étant de petite dimension, il permet la mesure d'un point précis.

Dans le domaine des scanners laser 3D, la mesure lidar est employée selon deux approches : la triangulation laser plane et la télémétrie laser. Les deux techniques reposent sur des principes différents et seront détaillées l'une après l'autre.

2.2.1.3. Capteur à triangulation

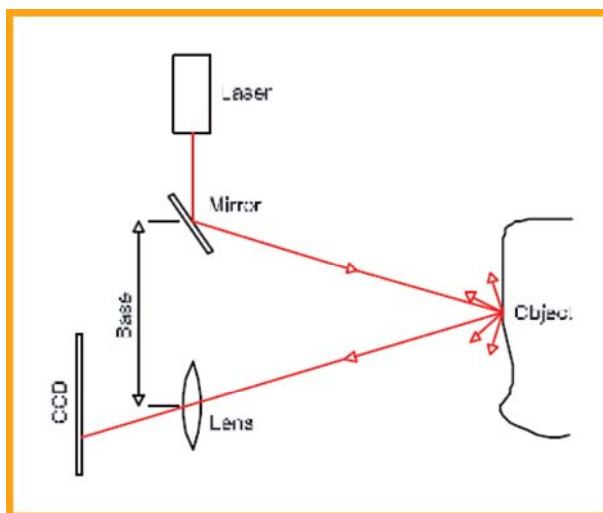


Figure 18 : principe de la triangulation laser d'après [BOE01]

À l'origine, la triangulation laser plane était beaucoup plus performante quant à la précision. Aujourd'hui, les différences liées à cette qualité sont beaucoup plus ténues. Le principe de la triangulation laser plane consiste à positionner la source laser à une distance donnée, la base, du capteur du rayonnement. La détermination de la position du point se fait par l'utilisation des règles trigonométriques. La réunion des deux

rayons et de la base composent un triangle dont suffisamment de paramètres sont connus pour permettre un calcul des coordonnées du point à déterminer. Pour permettre un balayage de l'objet à mesurer, il faut intégrer le laser à un dispositif mécanique. Le capteur fait appel à un faisceau laser de faible puissance et à un miroir mobile couplé à des moteurs asservis de précision. Ce principe de mesure est simple mais prend du temps pour le calcul du point : 100 points/seconde pour le scanner laser Soisic série S de MENSI [MAR02]. Ensuite, l'image du point émis sur l'objet mesuré est relevée par une caméra CCD³⁹. En vue d'optimiser l'utilisation d'un scanner à triangulation tel que le Soisic, une lumière ambiante relativement faible est préférable. Pour les relevés d'extérieur, il faut rechercher une intensité lumineuse faible ; l'ambiance nocturne est idéale [BOE99]. Du fait de son principe à base de triangle, la profondeur de champ varie de 1 à 60 m environ. La précision atteinte dans cet intervalle est assez importante : 1mm à une distance de 5m.

Les capteurs à triangulations ont une précision qui diminue proportionnellement au carré de la distance à l'objet, ce qui s'explique par le principe de détermination de la distance. Les scanners laser n'ont ainsi qu'une marge opérationnelle se situant entre les courtes et moyennes distances d'acquisition (De 2 à 40 m).

Les capteurs à triangulation ont d'abord été préférés pour des relevés d'ouvrage, car au début des années 1990, ils permettaient d'obtenir une plus grande précision. Cependant, au fil des évolutions, les recherches sur les lasers à temps de vol ont considérablement augmenté les performances liées à la précision. Ils sont plus utilisés aujourd'hui, car ils sont plus rapides et ont un champ de distance opérationnelle plus important.

2.2.1.4. Temps de vol

Les lasers à temps de vol appartiennent à l'ensemble d'appareil dénommé LiDAR. Ce principe peut être aussi bien utilisé en mode aérien que terrestre. Dans ce paragraphe, seul le LiDAR terrestre est traité, pour son application architecturale. La télémétrie laser utilise la mesure du temps de parcours d'un rayon lumineux jusqu'à l'objet mesuré : il s'agit d'une technique d'acquisition rapide. La source émet un rayon lumineux de nature connue qui rencontre l'objet et qui réfléchit le point

³⁹ CCD : Coupled Charged Device.

lumineux formé, détecté par le capteur. La distance de l'objet rencontré est calculée à partir du temps mesuré. La mesure de la distance doit être couplée au repérage de la direction du faisceau lumineux. Le rayon étant guidé par un miroir pour permettre le balayage de la scène, il faut enregistrer sa position à chaque mesure de distance. Les moteurs, qui orientent le miroir, fonctionnent avec une très grande précision et fournissent la valeur des deux angles nécessaires. La mesure est couplée à la prise de vue vidéo simultanée dont on peut récupérer des valeurs colorimétriques pour donner une valeur de couleur aux points pendant le post-traitement. La mesure de distance étant très rapide, certains dispositifs mesurent

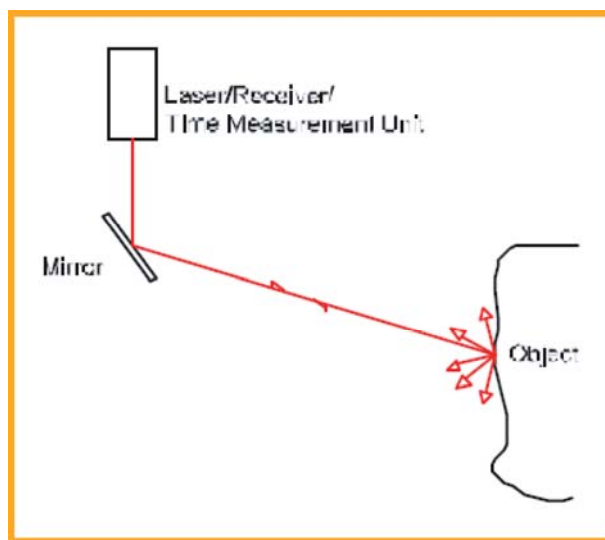


Figure 19 : principe du laser à temps de vol d'après [BOE01]

plusieurs fois le même point, ce qui permet de limiter les erreurs de mesure par compensation. En fonction des paramètres initiaux de mesure, la technique de balayage optique permet d'obtenir jusqu'à 10000 points par seconde. La mesure de la distance s'effectue grâce au capteur. Il est possible de distinguer trois modes de traitement du signal laser : le mode impulsionnel, avec par exemple les scanners de la série

HDS de Leica, Riegl ou la série GS de Trimble/Mensi, la détection par modulation d'amplitude avec les scanner Zuehler + Froehlich et par modulation de fréquence avec les appareils de Metric Vision. La première méthode consiste à envoyer une impulsion et à la rechercher dans les signaux reçus. La détection par modulation d'amplitude [BAR01], [GAL01] et [CHA02], ou de fréquence consiste à la mise en place d'une émission continue du faisceau avec des caractéristiques précises et à déduire la distance en comparant le signal reçu avec celui qui a été émis. Il faut noter que les mesures par modulation sont appropriées aux courtes distances mais que celles effectuées en modulation d'amplitude comportent des ambiguïtés [CHE03] et [GOU02]. En revanche, la modulation de fréquence procure une très grande précision.

Les lasers à temps de vol permettent d'effectuer des mesures à longue distance. De plus, le principe de ces capteurs rend envisageable la prise de mesures de façon très rapide. Le temps de vol tend à s'imposer vis-à-vis du capteur à triangulation pour ces deux raisons, mais aussi car la qualité de précision de ces derniers ne leur est plus exclusive.

2.2.2. Nuage de point

Les deux types d'acquisition laser produisent des nuages de points. C'est une forme de donnée fidèle par rapport à l'objet scanné : la visualisation d'un nuage de point rend très bien les détails de l'ouvrage. La manipulation d'un très grand nombre de points ainsi que l'exploitation de ce type d'information relève souvent du défi technologique.



Figure 20 : nuage de points

Le nuage de points est l'ensemble tridimensionnel des points mesurés par le capteur sur la surface de l'objet relevé. Les points sont enregistrés tout au long de l'acquisition. Les données relatives aux points sont au minimum les coordonnées X, Y et Z. Les valeurs de réflectance ainsi que de couleur de l'objet peuvent y être ajoutées. Les dispositifs aériens de LiDAR enregistrent aussi plusieurs échos du signal. Du fait de la plus grande distance entre le capteur et l'objet, le point lumineux est de l'ordre de 15 à 30 centimètres de diamètre. Avec de telles dimensions, le faisceau peut heurter des objets et ainsi avoir plusieurs échos pour la même émission. Les échos sont très utilisés pour qualifier le type d'objets mesurés, tels que

les bâtiments ou de la végétation. Les données enregistrées correspondent à une liste de points qui va être lue par la suite par un logiciel de traitement adapté. Le nuage de points obtenu correspond à une prise de vue de l'objet et non à un découpage logique des éléments qui le composent. La nature optique de l'acquisition laser, ainsi qu'en photogrammétrie, impose la multiplication des points de vue pour permettre de saisir, de manière la plus complète, la forme de l'ouvrage à relever. Le nuage de points est mesuré de façon régulière. Avant la phase d'acquisition, on procède à un paramétrage de la scène à mesurer. Il s'agit de définir la zone d'intérêt en choisissant un polygone de saisie sur une image de la scène par exemple, et, dans un second temps, de donner la distance entre chaque point en spécifiant le pas du nuage. Il est possible de spécifier plusieurs zones différentes avec des pas multiples, ce qui permet de s'adapter, en partie, aux différents niveaux de complexité de l'ouvrage à relever. La densité du nuage à scanner influe sur la vitesse d'acquisition : plus le nuage est dense, plus la vitesse de saisie est réduite. Dans cette perspective, la séance de paramétrage requiert de l'importance pour le temps de saisie et la qualité du nuage obtenu. La densité choisie combinée à la taille de l'objet à relever détermine la quantité de points du nuage. Certaines scènes peuvent ainsi contenir entre 50 et 100 millions de points. La taille d'un nuage de points a une grande influence sur la phase de post-traitement qui correspond à l'exploitation du nuage obtenu.

2.2.3. Post-traitement

Les coordonnées des points d'un nuage provenant de la saisie par balayage optique sont connues dès l'acquisition, ce qui n'est pas le cas pour les données issues de la photogrammétrie. Ces deux techniques d'acquisition à distance permettent, certes, un déplacement du temps de travail du relevé vers le laboratoire, mais les post-traitements relatifs aux données obtenues sont radicalement différents. Cela s'explique par la différence des données produites.

2.2.3.1. consolidation

Une fois l'étape d'acquisition terminée, le nuage de points correspondant à la scène relevée n'est pas en un seul morceau. Les différents points de vue, nécessaires à une restitution fidèle de l'ouvrage, correspondent à autant de « sous nuages » de

points. Les coordonnées des points de chaque nuage sont exprimées selon un référentiel relatif au scanner. Le scanner ayant changé de position et d'orientation pendant l'acquisition des différents points de vue, les nuages de points respectifs ne se correspondent pas entre eux, seule leur échelle est la même, sachant que l'appareil mesure les distances. L'étape de consolidation est le moyen de recalibrer tous les nuages de points de la même scène dans un référentiel commun. En fonction des évolutions et des choix des différents constructeurs, on peut différencier trois moyens de consolider plusieurs nuages de points d'une même scène.

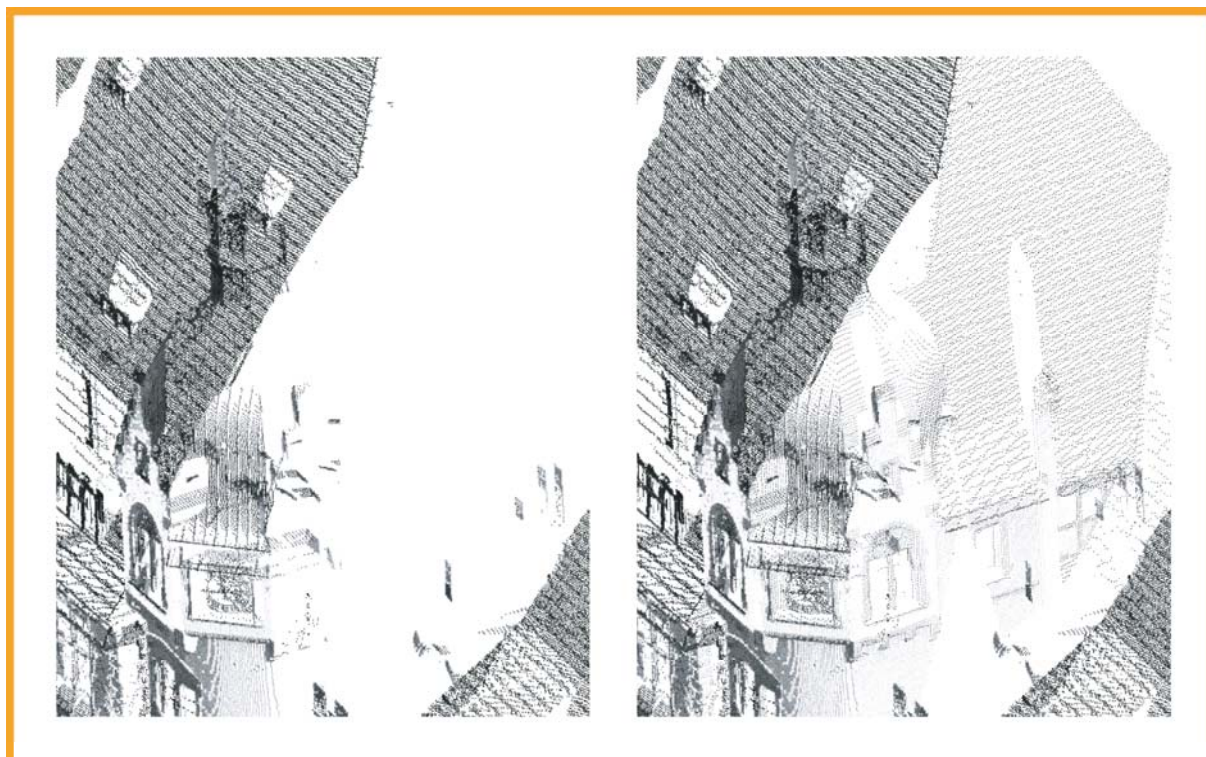


Figure 21 : consolidation de deux nuages de points

Le premier consiste à trouver des points communs entre les différents nuages. Pour ce faire, il est nécessaire, en raison des trois dimensions de l'espace cartésien, d'avoir un minimum de trois points communs. Une bonne répartition de ces points en fonction des zones communes est aussi recommandée pour un recalage le plus efficace possible. Soit on détermine des particularités identifiables sur les nuages, ce qui peut se révéler assez difficile dans certains cas, d'autant plus que la trame des points est arbitraire et différente pour tous les nuages de points ; soit on dispose de façon appropriée des cibles dans la scène. Celles-ci sont scannées, dans un premier

temps, indépendamment de la scène pour être reconnues automatiquement pendant la consolidation, qui se fait par la suite.

Le deuxième moyen de consolidation consiste à mesurer des points de la scène à l'aide d'un appareil topographique, tel qu'un tachéomètre. Cette opération doit être faite avec les mêmes précautions de consolidation que pour les cibles : trois points fixés par nuage au minimum. Il est préférable de déterminer ces points avant l'acquisition pour augmenter la densité de mesure dans chacune des zones où ils se trouvent. Cette précaution réduit considérablement l'incertitude liée au point de calage. Chaque nuage est ainsi recalculé dans un référentiel commun. Ils peuvent donc être regroupés dans un seul et unique nuage.

Après avoir vu comment il est possible de consolider plusieurs sous nuages en un seul nuage dans un référentiel global, puis comment replacer chacun des sous nuages dans l'absolu pour les considérer dans un seul finalement, il faut citer la démarche que le scanner GSX de Trimble propose. Le scanner peut être positionné sur une station dont les coordonnées sont connues. Les différents points de vue sont réalisés selon les principes du cheminement par polygonaire topographique ; les points sont ainsi saisis dans un seul référentiel dès le départ. Le rattachement au référentiel absolu se fait en post-traitement en insérant les coordonnées des différentes stations parcourues.

Dans cette perspective, l'étape de consolidation permet la mise en place d'un référentiel global dans lequel sont intégrés tous les sous nuages. En fonction des précautions préalables et des systèmes utilisés, cette phase est plus ou moins rapide. Les différents principes permettent une automatisation qui prend de plus en plus de place pour cette étape. La taille du nuage de points ainsi que le nombre de points de vue influe de façon évidente sur la durée effective de ce traitement. Le nuage de points résultant de la consolidation peut ensuite être traité en fonction de la scène relevée.

2.2.3.2. Segmentation

La segmentation permet principalement deux actions : le nettoyage du nuage et sa subdivision en parties identifiables.

Dans un premier temps, le nuage étant « brut » de saisie, il faut le « filtrer ». En effet, tous les points qui composent le nuage ne correspondent pas à l'objet. On peut les différencier. On a tout d'abord ce qui est considéré comme du bruit : l'appareil, pour des raisons plus ou moins déterminées, crée des points aberrants. Ils ne correspondent à rien d'identifiable. Ensuite, on considère les masques intempestifs. L'acquisition d'ouvrage bâti se fait le plus souvent dans des endroits où l'activité n'est pas stoppée, ce qui provoque la présence de points ayant percuté un passant ou un véhicule en mouvement. Le site n'étant pas toujours préparé à la mission, des masques provoqués par des objets immobiles sont aussi à prendre en compte. Il faut ajouter à cela les objets faisant partie cette fois du contexte de l'ouvrage, tels que des arbres ou des bâtiments voisins. Pour clore la liste des éléments qui ne constituent pas la scène d'intérêt, il faut mentionner les éléments lointains ayant été scannés, qui se situaient dans le polygone de saisie définis. Des améliorations ont été faites pour minimiser ce genre d'acquisition non désirée grâce à la possibilité de choisir une plage de distance dans laquelle se trouve l'objet, d'une part, et à l'évolution du rectangle de sélection au polygone, d'autre part.



Figure 22 : segmentation d'un nuage de points

La première phase de nettoyage des éléments ne faisant pas partie de la scène permet de réduire la taille du nuage et surtout de recentrer les données sur l'objet considéré. Il est à noter que la partie du nuage de points concernant l'ouvrage peut faire l'objet d'une seconde phase de nettoyage. En effet, le relevé d'extérieur peut parfois s'étendre à l'intérieur de l'ouvrage par les baies vitrées.

La segmentation peut prendre tout son sens, une fois le nuage prêt à la différenciation des parties identifiables de l'ouvrage. La définition du pas du nuage au moment de l'acquisition est indépendante de la constitution de l'édifice. La segmentation est le moyen de constituer des sous-ensembles logiques correspondant aux éléments identifiés du bâtiment. On constitue ainsi des groupes de points spécifiques en les sélectionnant à l'écran. Par conséquent, la segmentation s'exécute manuellement. Pour faciliter la sélection, il convient de choisir le point de vue le plus adapté. Pour obtenir une segmentation la plus fine possible, il convient de procéder par raffinements successifs : isoler dans un premier temps une zone, que l'on va ensuite re-diviser, et ce jusqu'à obtenir le groupe de points désiré. Les logiciels de segmentation, tel que RealWorks Survey [REA06], offrent des fonctions pour isoler des groupes de points. On peut citer la reconnaissance de plan par la saisie de trois points ou encore la création d'une section relative à une plage donnée.

La segmentation est une classification du nuage de points de la scène globale. Elle ne modifie pas le nombre de points du nuage. Les manipulations sur l'intégralité du nuage restent difficiles et sont directement fonction de sa taille. Cette étape de hiérarchisation des données permet l'exportation des ensembles logiques, ainsi différenciés, vers des interfaces de traitements spécifiques de nuage. Il est possible de relier les points du nuage par des faces ce qui permet de tenter un rendu réaliste de l'objet saisi par un maillage. La segmentation facilite l'application d'un maillage sur des sous-ensembles de points rendus plus homogènes en densité. L'exportation vers un logiciel de modélisation est une des autres possibilités qu'offre la segmentation.

2.2.3.3. Modélisation

L'approche de segmentation, dans un premier temps, permet de commencer à rationaliser l'amas de données que représente le nuage de points dans sa forme

brute. La modélisation à partir des segments de nuage est basée sur la décomposition de la forme décrite par les points, par une combinaison de différentes primitives géométriques. La modélisation d'ouvrage à partir de nuage de points est un sujet de recherche quant à l'automatisation. [BEG03], [KAD04]. L'automatisation de la transformation de nuage de points en primitive architecturale fonctionne très bien dans le domaine de l'industrie [CHA02]. Il s'agit dans ce cas de reconnaître des canalisations dont la géométrie de base est le cylindre. La reconnaissance de forme de base dans un nuage de points fait l'objet de recherches, mais toujours pour des formes simples [RAB04].

En architecture, les primitives sont beaucoup plus complexes de par leur composition [BRA97], mais aussi par la dégradation de certains éléments qui nuit à la reconnaissance de forme. Ainsi, l'automatisation de la modélisation géométrique à partir de nuage de points est un enjeu majeur.

2.2.3.4. Facettisation

Le nuage de points est la forme brute des données issues de l'acquisition à balayage optique. Pour des considérations liées à la représentation, on pratique la facettisation de ce nuage [MON05]. Celle-ci s'effectue à l'aide d'outils de maillage ou encore de polygonisation qui regroupent des algorithmes construisant des facettes entre les différents points du nuage. Le résultat est obtenu par des algorithmes de triangulation et par des calculs d'approximation des moindres carrés. Le nuage de points est, de cette manière, transformé en une surface. Il faut, toutefois, l'optimiser afin de faire disparaître des artefacts indésirables éventuels provenant soit de l'acquisition, soit de la simplification lors du maillage.

Le maillage est utilisé en tant que traitement automatique pour obtenir une représentation homogène du nuage de points ; on peut l'appliquer à l'ensemble d'un ouvrage, mais on peut se poser la question quant à l'intérêt d'un maillage automatique vis-à-vis d'une représentation qui prendrait en compte des principes liés à l'ouvrage. L'usage du maillage est pertinent, quand on veut représenter un objet que l'on ne peut pas, ou difficilement, décomposer en primitive géométrique. Ainsi, ce traitement de nuage de points est adapté aux objets qui présentent des morphologies complexes : statues, détails ornementaux. Le traitement algorithmique

appliqué lors du maillage permet de diminuer considérablement le volume des données mais il s'opère une perte d'informations et de précisions.

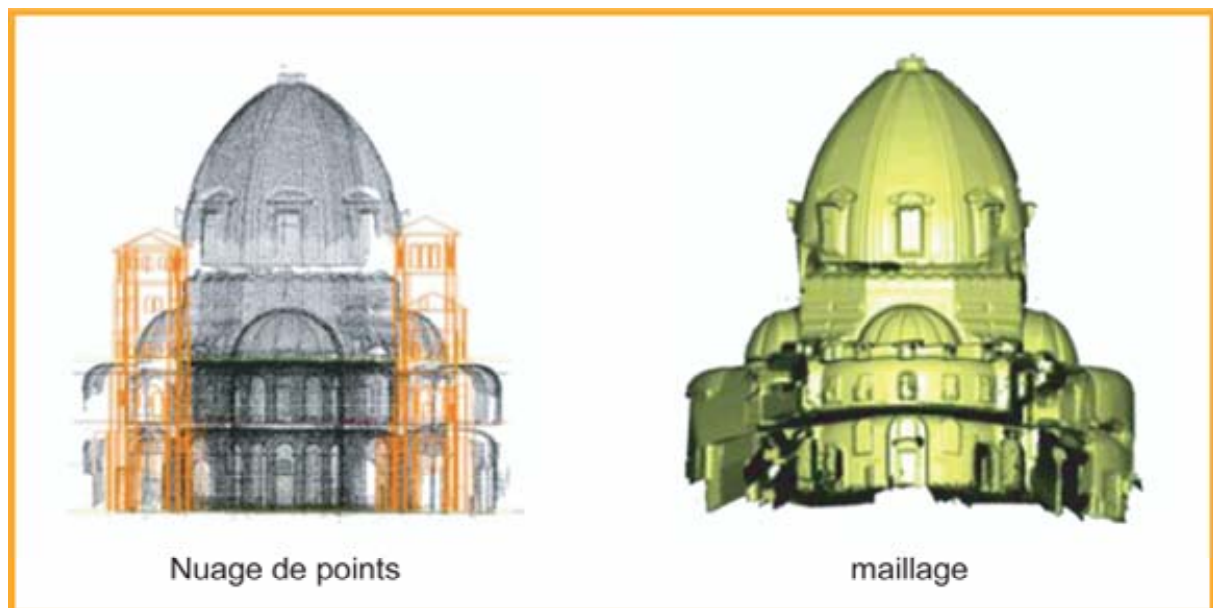


Figure 23 : nuage de points et maillage d'après [MON05]

2.2.3.5. Ortho-images

La concurrence entre la photogrammétrie et le laser implique des productions similaires. Il est possible de générer des ortho-images dans les deux cas. Le principe est le même qu'en photogrammétrie, mais ici on utilise le nuage de points en guise de « MNT ». La résolution est, de ce fait, très grande. On récupère les informations colorimétriques à partir du capteur CCD intégré ou encore à partir d'images, certes orientées dans un second temps, mais de meilleure définition provenant d'un appareil numérique.

2.2.4. Synthèse relative au balayage optique

Le relevé d'ouvrage par LiDAR offre un grand nombre de possibilités. C'est une technique très précise, en relation aux besoins du relevé architectural. Cet outil d'acquisition est aussi très rapide -jusqu'à points à la seconde-, pour le laser à temps de vol. Il est important de noter que les coordonnées des points sont enregistrées dès l'acquisition, ce qui permet une visualisation du résultat sur place. De plus, la

combinaison du nuage de points avec les informations issues du capteur CCD permet d'affecter une couleur réelle à chaque point, ce qui augmente le réalisme.



Figure 24 : nuage de points avec et sans les couleurs de l'objet

La nature arbitraire du nuage est néanmoins un aspect important, car elle induit un grand nombre de traitements et notamment des phases où l'intervention de l'opérateur est indispensable.

L'acquisition par scanner laser hérite des inconvénients de toutes les techniques à base de principes optiques : ce qui n'est pas visible depuis le point de vue, n'est pas identifiable.

2.3. Autres Techniques

La photogrammétrie et le balayage optique constituent les deux techniques envisageables pour le relevé architectural. Ces deux techniques sont les plus appropriées du fait de leurs performances et de leur mise en œuvre. L'évocation de l'acquisition de données tridimensionnelles ne doit pas pour autant se limiter à ces deux aspects. Dans ce chapitre, nous allons brièvement exposer quelques techniques émergentes d'acquisition tridimensionnelles.

2.3.1. Laser ligne

Le principe de la triangulation laser est utilisé dans un autre système : le Konica-Minolta Vivid-900 [IUL05]. Il projette une ligne à l'aide d'un rayon laser sur l'objet et un capteur CCD enregistre la projection de la ligne déformée par l'objet. Ce dispositif est destiné au relevé de petits objets et est accouplé à une table tournante qui permet de changer de point de vue très rapidement. Ce principe combine la projection de motifs et la triangulation pour produire des données tridimensionnelles.

2.3.2. Lumière structurée

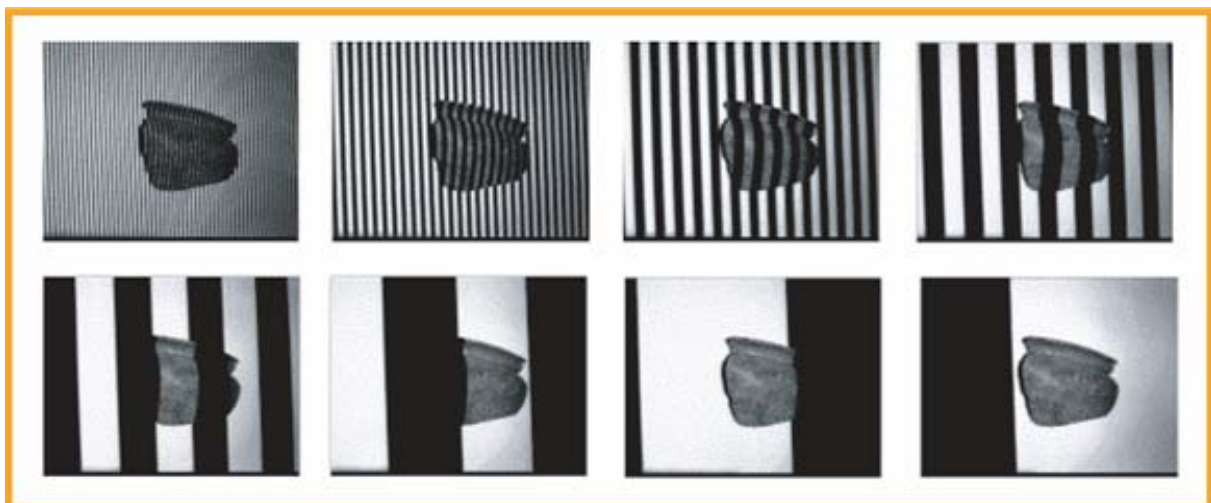


Figure 25 : projection de motifs sur un objet à relever d'après [TUW00]

Nous avons vu que la projection d'un rayon laser permettait, par l'interprétation du signal reçu, de déterminer la position du spot ou de la ligne. La projection de formes diverses par le biais de grilles ou de frange (système COMET ou ATOS) est aussi un moyen de mesurer des formes proches. Le relief est recomposé en utilisant le

principe de moirures que les projections légèrement décalées d'un motif, enregistrées et analysées, produisent.

Ces techniques d'acquisition ont des procédés performants mais consternent le relevé d'objets de taille réduite et surtout sont soumises aux à une utilisation en intérieur. Les conditions de prise de vue plus distantes de l'objet et surtout dans un environnement extérieur que constitue le relevé d'ouvrages architecturaux ne nous permettent pas de considérer ses procédés comme utilisables pour nos préoccupations.

2.4. Comparaison entre laser et photogrammétrie

Les deux techniques d'acquisition que sont la photogrammétrie et le balayage optique sont de nature différente mais ont des applications communes. C'est depuis ce champ commun que la comparaison est effectuée. En tant qu'utilisateur, nous cherchons à comparer ces deux outils en mettant en place quatre critères de comparaisons : le principe, le matériel, le processus et enfin les données produites.

2.4.1. Principe

C'est le principe de mesure qui génère la particularité de chaque technique d'acquisition. Les différences de mode d'acquisition entre la photogrammétrie et le laser sont fondamentales. La comparaison ne doit pas seulement permettre la différenciation, car on peut aussi déceler des points communs notamment du point de vue de la nature optique dont sont dérivés les deux principes.

2.4.1.1. Différences fondamentales

La mesure photogrammétrique se fait à partir d'images prises d'un objet ; on utilise les images comme support de la mesure : c'est une mesure indirecte et manuelle. Il en est autrement pour le faisceau laser des systèmes à balayage optique qui parcourt l'objet et mesure périodiquement la distance qui le sépare de la source ainsi que les angles dans un référentiel donné. Les points obtenus sont mesurés directement sur l'objet : c'est une mesure directe et automatique.

Les capteurs des appareils photographiques utilisent la lumière ambiante pour en générer les images de l'objet alors que le laser produit son propre faisceau. Cette distinction entre les deux principes peut se caractériser par l'antagonisme : système passif / système actif. Le laser peut ainsi se passer de la lumière du jour et, de ce fait, être opérationnel dans l'obscurité.

2.4.1.2. Points communs :

Les deux mesures se font dans le domaine visible ; tout élément se situant entre l'appareil d'acquisition et l'objet à mesurer le cache en créant ainsi un masque. Ces masques sont soit dus à la position de l'appareil et, dans ce cas, il faut multiplier les prises de vue [GOU99], soit le masque n'est pas contournable. Ainsi, les éléments

qui ne peuvent être vus ne peuvent pas être mesurés ; leur modélisation ne peut donc pas se faire grâce aux techniques d'acquisition.

Les mesures effectuées sont faites dans un référentiel particulier. Il est nécessaire, si l'on veut rattacher les données dans un référentiel absolu, de prendre des mesures au préalable avec des instruments topographiques, tel qu'un tachéomètre.

2.4.1.3. Exemples

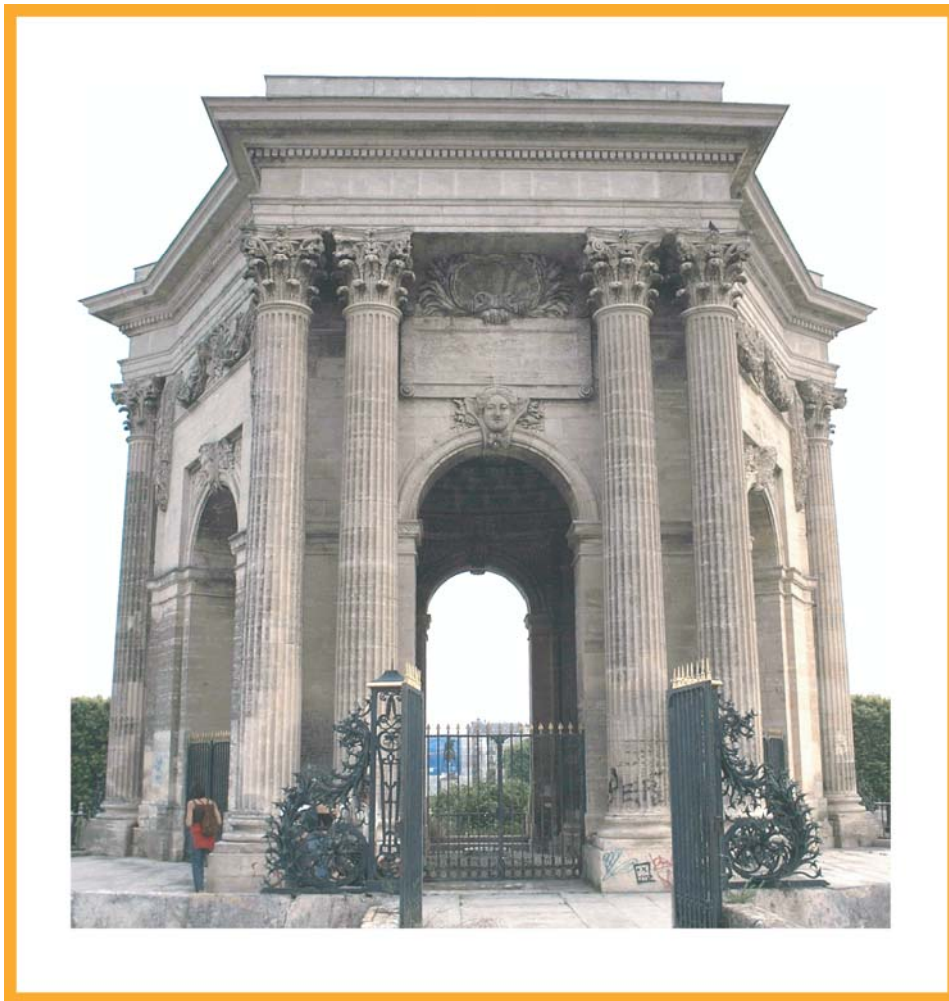


Figure 26 : le château d'eau de la promenade du Peyrou à Montpellier

Exemple de cas particuliers où les deux techniques, par leurs différences permettent ou non, de traiter les mesures facilement. Pour illustrer ces cas, nous utiliserons le projet de modélisation du château d'eau de la promenade du Peyrou à Montpellier (figure 26) [FUC04].

Le premier cas correspond au traitement des limites d'objets plans. En effet il est plus aisé de déterminer les limites d'éléments plans en photogrammétrie qu'à partir d'un nuage de points. L'opérateur peut les pointer sur les images à sa disposition car il les voit, alors que de telles discontinuités sont plus difficilement perceptibles sur le nuage. En effet, les limites s'expriment par une absence de point. Il est possible de reconstruire la limite d'une surface si elle est commune avec une autre surface mais dans un plan différent. On calcule alors l'intersection des deux plans. De la sorte, on palie l'absence de définition des limites par le nuage de points.



Figure 27 : nuage de points du château d'eau

La détermination d'objets de révolution constitue le deuxième cas particulier. La restitution d'éléments de révolution, tels que les cylindres, la sphère ou les cônes,

pose problème au photogrammètre. En effet, et ce contrairement aux limites de plans, la surface courbe ne propose pas de zone contrastée et ne permet pas le pointé. Il est donc difficile de rendre ce type de surface. La mesure laser selon une grille régulière ne connaît pas cet inconvénient, sauf si la trame est plus grande que l'élément concerné.



Figure 28 : restitution du château d'eau

Enfin, il faut considérer les objets sculpturaux ou encore plastiques. Les objets complexes et non décomposables géométriquement posent le même problème que les éléments de révolution, auxquels s'ajoute une grande complexité due à la forme même de ces objets. En effet, les variations de formes n'offrent pas suffisamment de contraste pour rendre possible une restitution photogrammétrique. Au contraire, les dispositifs à balayage optique sont particulièrement performants dans ce domaine. Dans ce cas, la densité du nuage est augmentée dans ces zones pour permettre une définition plus fine de ces éléments, car les nombreuses inflexions de la surface doivent être toutes restituées.

Une particularité concernant la photogrammétrie est encore à noter : le stockage des images apporte une multitude d'informations nécessaires à la compréhension de l'objet et permet de mesurer des points sinon non mesurables, alors que le nuage de points, même colorisé en vraie couleur, ne peut apporter des informations en dehors des points qu'il contient.

Les figures 27 et 28 illustrent ces trois cas. On peut remarquer la difficulté de restitution photogrammétriques que représentent les chapiteaux, les cannelures, la clé de voûte ainsi que les détails du médaillon. Par contre les éléments anguleux et réguliers, tels que corniches, entablement et voûtes, sont plus faciles à restituer. Le nuage issu du scanner montre que les mesures peuvent être faites indépendamment de la forme du support. En effet, mis à part les masques propres, le nuage est complet. Il est à noter que les grilles ont été saisies malgré la faible densité du nuage dans cette zone. La difficulté d'interprétation de l'opérateur ne se situe pas au même moment. Le restituteur les rencontre dès la mesure (figure 28) alors que c'est pendant la modélisation à partir du nuage qu'elles vont se faire ressentir pour les données laser.

2.4.2. Matériel

Le critère de comparaison, lié au matériel plus particulièrement, a de l'importance car la facilité du relevé et l'accessibilité pour l'utilisateur en dépend directement.

2.4.2.1. Portabilité / Flexibilité :

Le premier point concerne la maniabilité des appareils à emporter sur le terrain. Les appareils de prise de vue photographiques, aussi bien argentiques que numériques sont le résultat de près de 150 ans de miniaturisation. Pour un poids dépassant rarement les deux kilogrammes et une ergonomie aboutie, ce sont des appareils qui permettent un relevé rapide et facile. Les scanners laser, en forte évolution, sont encore des objets assez imposants. Même s'il est possible de les porter dans un sac à dos, il pèse encore plus de douze kilogrammes. De plus, il est indispensable de les poser sur un trépied pour l'acquisition ; on ne peut donc pas encore aborder le sujet de l'ergonomie. L'installation en station est aussi synonyme de sécurisation du poste de prise de vue. Les prises de vue depuis une voie de circulation sont ainsi très difficiles à faire pour le laser, alors que la rapidité d'un cliché le permet.

2.4.2.2. Matériel annexe :

Lors d'un relevé, il est préférable, pour faciliter les post-traitements de positionner des cibles de recalage sur la scène à relever, soit directement sur l'objet, soit sur des trépieds, en fonction des modes de relevé et des modèles de scanners.

L'autonomie en mémoire et en batterie ne nécessite pas l'apport d'autres matériels que l'appareil de prise de vue en photogrammétrie. Outre le trépied, indispensable pour la station stable de l'appareil, il est encore nécessaire d'avoir un ordinateur à côté du scanner pour collecter les points et organiser interactivement la prise de vue. Même si les organiseurs personnels commencent à remplacer les ordinateurs portables, le scanner n'est toujours pas autonome. De plus, ce type d'appareil consomme aussi de l'électricité, qu'il faut lui fournir via des batteries, un générateur ou encore une alimentation au secteur, si cela est possible.

2.4.2.3. Prix

La démocratisation de la photographie aide au faible coût des appareils de prise de vue. En effet, la fourchette des prix s'étend de 300 à 5000 euros pour des appareils numériques. Les logiciels de photogrammétrie sont aussi abordables, du moins pour les premiers prix. On trouve ainsi des logiciels de photogrammétrie multi-images à partir de 1000 euros. Mais les prix peuvent aller jusqu'à plus de 10000 euros pour de puissants logiciels de stéréophotogrammétrie. Il en est tout à fait autrement concernant les scanners Laser, dont les prix oscillent entre 80 000 et 120000 euros. Les logiciels, souvent vendus par les constructeurs même des appareils, ont un prix d'environ 10000 euros. On peut donc constater que pour moins de 1500 euros, la photogrammétrie est utilisable et abordable et on peut en obtenir de très bons résultats, ce qui est presque que dix fois moins onéreux que la technologie Laser.

2.4.3. Processus

Le critère lié au processus, c'est-à-dire aux démarches à mettre en œuvre pour un relevé architectural grâce à la photogrammétrie ou le balayage optique, se divise en deux sous étapes : l'acquisition sur le terrain et les post-traitements à effectuer pour obtenir les données utilisables pour la modélisation d'ouvrage.

2.4.3.1. Acquisition

Nous avons vu au moment de l'énoncé des principes que les deux techniques sont très différentes mais qu'elles étaient, malgré tout, soumises au principe de l'optique, commun aux deux. C'est pour cette raison que la phase d'acquisition comporte un grand nombre de points communs. Pour appréhender de façon satisfaisante le relevé complet ou partiel d'un ouvrage, il convient de réaliser plusieurs prises de vues de celui-ci. De plus, ces portions de saisies doivent comporter une zone importante de recouvrement deux à deux⁴⁰.

Pour des raisons de démocratisation et d'accessibilité de la photographie, le relevé photogrammétrique peut être réalisé par un opérateur novice avisé [WAL94]. En effet, une fois les contraintes liées aux principes photogrammétriques assimilées, tout un chacun peut se lancer dans un relevé architectural. Il faut noter, que l'expertise permet d'éviter les écueils que rencontrent les opérateurs non expérimentés pendant leurs premiers relevés comme, par exemple, la divergence de prise de vue en multi image. Au contraire, seuls les spécialistes peuvent utiliser le balayage optique, les caractéristiques liées à l'accessibilité, qu'elles soient d'ordre pécuniaire, technologique et ergonomique, n'étant pas encore réunies.

Les arguments abordés pour présenter le critère du matériel se retrouvent ici pour la phase d'acquisition : l'ergonomie des appareils de prise de vue photogrammétriques participent grandement à la rapidité de l'acquisition. La lourdeur du matériel principal, que constituent le scanner sur son trépied et l'ordinateur portable, est augmentée par la mise en place des cibles de recalage entre les points de vue. Il est possible de ne pas en utiliser, mais c'est au détriment de la précision du nuage final ainsi que de l'automatisation de traitements ultérieurs. En effet, ces cibles permettent de créer un référentiel commun à tous les points de vue du relevé Laser. La reconnaissance automatique de ces cibles par le programme de consolidation accélère cette phase beaucoup plus laborieuse autrement. Le temps d'acquisition des appareils est à prendre en compte. Outre l'installation et le transport, qui nécessite un temps variable en fonction des caractéristiques du matériel, révélant de ce fait la maniabilité de l'outil photogrammétrique, la durée de la saisie est un point capital à prendre en considération. Les scanners laser à temps de vol permettent la saisie de 500 à 5000

⁴⁰ Pour l'orientation relative ou la consolidation.

points par seconde et la durée d'une station s'approche d'une demie heure, si l'on prend en compte les réglages et les paramétrages dans le meilleur des cas. La prise de vue photographique étant instantanée (une fraction de seconde), le relevé laser prend donc beaucoup plus de temps sur le terrain.

L'acquisition des données sur le terrain est un élément essentiel du relevé ; il est important qu'elle se déroule le mieux possible et permette d'obtenir les jeux de données les plus précis, fiables et complets possible car la finalité du relevé en dépend en grande partie. Les données résultant de l'acquisition doivent être traitées avant de pouvoir être exploitées pour la modélisation : c'est le post-traitement.

2.4.3.2. Post-traitement

Les post-traitements respectifs aux deux techniques, que sont la photogrammétrie et le balayage laser, sont très différents car les données initiales, obtenues après l'acquisition, n'ont rien en commun. De la mission photogrammétrique, on obtient une collection d'images de l'objet considéré. Les images sont bidimensionnelles et n'apportent pas d'information liée à la mesure. Au contraire, les données laser, qui sont sous la forme de plusieurs nuages de points, correspondant aux différentes stations, sont des points en trois dimensions et correspondant déjà aux dimensions de l'objet saisi.

Ces données brutes de saisie n'ont pas le même niveau de raffinement si l'on considère le point de vue de l'information dimensionnelle produite. Les post-traitements à apporter ne sont donc pas de la même importance. Il est possible, néanmoins, de trouver certaines similitudes entre les deux procédés, et ce encore une fois du fait de leur dépendance aux propriétés optiques.

Les deux jeux de données sont fragmentés en fonction des points de vue qui ont été faits de l'objet pendant l'acquisition sur le site ; il faut donc commencer par mettre en relation toutes les données concernant l'objet relevé, à savoir ce qui correspond à l'orientation relative pour la photogrammétrie et à la consolidation pour le balayage optique. L'orientation en photogrammétrie multi-image est un processus long et manuel : pour chaque couple d'images, environ quinze points homologues doivent être cliqués. Plus le nombre d'images nécessaires est grand, plus l'orientation prend du temps. En revanche, même si la durée de la consolidation est aussi

proportionnelle au nombre de stations, elle est semi-automatique, voire complètement automatique pour les scanners permettant la polygonation (Trimble GX). Au terme des étapes d'orientation relative et de consolidation, les données respectives composent une seule entité de part et d'autre, soit un bloc d'images pour la photogrammétrie et un nuage de point complet pour le laser.

A ce moment du traitement des données, il faut noter une différence majeure entre les jeux de données : mis à part les points homologues nécessaires à l'orientation, aucune donnée significative pour le relevé et l'information n'a été créée alors que le nuage de points issu du scanner n'a accumulé que des zones de redondance, c'est-à-dire une zone commune entre les nuages de points. Cette remarque induit la différence principale, existant entre les deux techniques, qui réside dans la notion de choix des données : les données photogrammétriques sont choisies et pointées en fonction d'une pertinence alors que les données laser sont créées automatiquement et le choix ne se fait que dans le nuage résultant de l'acquisition. Après la fusion des éléments fragmentaires correspondant aux différents points de vue, les données dimensionnelles sont complètes pour la technique de balayage optique, alors qu'elles sont presque inexistantes en ce qui concerne la photogrammétrie.

Si l'on poursuit la comparaison de façon parallèle entre les post-traitements respectifs, le nombre de points évolue de façon inversement proportionnelle entre les données laser et celles qui sont issues de la photogrammétrie. Le nuage de points est ordonné, nettoyé et rééchantillonné et perd des points pendant la segmentation, alors que la restitution photogrammétrique produit les points qui constitueront le jeu final de données photogrammétriques. Cette étape est fondamentalement celle où les deux jeux de données gagnent en pertinence pour enfin être prêts à servir à la modélisation.

En ce qui concerne le nuage de point laser, l'intervention humaine se place à la dernière étape, à savoir celle de la segmentation. Il s'agit là de choisir les points pertinents, c'est-à-dire selon des critères subjectifs. La multitude de points peut prêter à confusion et provoquer des erreurs d'interprétation au moment de la segmentation. Cette interprétation est d'autant plus difficile qu'elle se fait sur un support visuel assez éloigné dans sa représentation de l'apparence de l'objet auquel

il fait référence si l'on compare le nuage de points, même en vraies couleurs, à une simple image de l'objet.

Les deux techniques que nous confrontons ont des données brutes dont la différence impose des post-traitements particuliers pour chacune mais qui restent comparables par les similitudes téléologiques et optiques. Les post-traitements appliqués aux images sont en majorité manuels, alors qu'inversement, le nuage de points laser subit des traitements presque complètement automatiques. De plus, la phase de post-traitement photogrammétrique est une phase de création des données, alors que pour le laser, on assiste plus à un raffinement des données brutes. On peut remarquer que cette phase de post-traitement est une phase où la notion de pertinence des données joue un rôle capital. Ce sont les données en résultant qui vont servir à la modélisation.

2.4.4. Données

Les données photogrammétriques et laser sont construites et transformées depuis l'acquisition pour aboutir à la modélisation. Les divergences entre les systèmes d'acquisition impliquent une grande différence de nature des données brutes. De plus, l'information enregistrée se situe à deux niveaux de représentation très particuliers. Si l'acquisition laser enregistre des points en trois dimensions dès le début, leur représentation prend un caractère virtuel, même si des vues sur un nuage de points peuvent prendre une forme très réaliste. Au contraire, les images issues des prises de vue photogrammétriques représentent l'ouvrage tel qu'il a été vu par l'opérateur. Les données laser sont donc plus fidèles à l'aspect dimensionnel de l'ouvrage, alors que les images sont plus proches de l'aspect réel.

De plus, le nombre de points est très différent : plusieurs millions pour le nuage de points laser contre quelques centaines ou, tout au plus, quelques milliers pour le semis de points issus de la restitution photogrammétrique. La différence de quantité de points s'explique, au final, par l'acquisition systématique et automatique des dispositifs à balayage optique [LUC06], alors que les données photogrammétriques sont constituées manuellement et de façon sélective.

Une fois les données finales obtenues, il faut se poser la question de la précision avec laquelle elles sont mesurées. Hormis les caractéristiques techniques des deux

principes où le balayage optique est considéré comme ayant une précision plus homogène sur le jeu de données complet, mais les deux techniques sont équivalentes sur les valeurs des erreurs [RON05] ; il faut considérer l'intervention humaine comme facteur déterminant pour la précision finale. Comme on a pu le constater au cours de ce comparatif entre les post-traitements, les automatisations sont beaucoup plus présentes du côté de la technologie laser que de celui de la photogrammétrie. En effet, alors que la consolidation est réalisée, dans le cas le plus défavorable, semi-automatiquement, l'orientation est complètement manuelle. La restitution à partir des images est également manuelle. On peut donc affirmer que la précision des points obtenus est presque complètement le résultat de données du constructeur [LUC06] en ce qui concerne la technique de balayage optique, puisqu'il y a peu d'intervention humaine. En revanche, les données photogrammétriques sont intimement liées à l'expertise du restituteur puisqu'elles sont le fruit, en majeure partie, de l'intervention humaine.

Il faut noter que la production des données dimensionnelles se passe au moment de l'acquisition pour le laser. Si, dans le jeu de données obtenu, il vient à manquer des informations, il faut retourner sur le site. En revanche, les images issues des prises de vues photogrammétriques recèlent un potentiel d'exploitation qui permet une souplesse dans la mesure : si des données n'ont pas été créées au moment de la restitution, et qu'elles figurent sur plusieurs clichés, le jeu de données peut alors être complété.

Les images peuvent encore servir, après la restitution, pour analyser l'ouvrage relevé. La photo-interprétation apporte beaucoup d'explications sur la composition des façades, sur les relations particulières entre les différents éléments décoratifs, par exemple.

Tout au long des post-traitements les données respectives vont être transformées pour finalement être utilisées pour la même tâche. Même si les données brutes sont radicalement différentes, l'apport de pertinence contribue à orienter les jeux de données finaux vers une forme d'information très semblable. Ces jeux de données constituent la référence dimensionnelle à l'ouvrage qu'il faut modéliser. La phase de modélisation se sert de ces données à tout moment pour dimensionner les éléments du modèle.

2.4.5. Synthèse du comparatif

Comparaison des techniques d'acquisition	Photogrammétrie	Balayage optique
Principe	La nature optique des techniques : nécessité de multiplier les points de vue. Géoréférencement des données à effectuer a posteriori	
	Système passif Mesure indirecte et manuelle à partir d'images.	Système actif Mesure directe et automatique.
Matériel	Appareil photo numérique Ergonomique Grande autonomie Logiciel et matériel bon marché	Scanner laser + Ordinateur + Trépied Matériel encombrant et statique Dépendance énergétique Logiciel et matériel onéreux
Processus d'acquisition	Angle de vue modeste Un point nécessite trois prises de vues. Prise de vue instantanée	Appareil à grand champ de mesure. Chaque zone doit être scannée plusieurs fois pour les masques Chaque station prend du temps
Processus de traitement	Orientation des images Restitution Pertinence de la mesure	Consolidation entre les points de vue Segmentation du nuage Pertinence du choix des points
Données	Données produites manuellement. Données saisie à la demande. Images haute résolution	Données mesurées automatiquement. Grande quantité de données à filtrer. Images base résolution

2.5. Conclusion sur les techniques d'acquisition

Photogrammétrie et Lasergrammétrie sont deux techniques de mesure qui correspondent à l'échelle des édifices. Leur utilisation nécessite une bonne expérience pour mettre correctement en œuvre les prises de vues nécessaires à l'obtention de données convenables. Néanmoins chaque technique prise séparément ne permet pas d'obtenir un jeu de données complet pour envisager la modélisation globale d'un ouvrage. Une première hypothèse, correspondant au sujet de ce travail, consiste à combiner les deux procédés en vue de réduire ce manque de données dimensionnelles. La combinaison des deux techniques ne peut s'envisager qu'à la condition qu'elles soient complémentaires et que les données puissent être utilisées conjointement.

2.5.1. Complémentarité :

La complémentarité de la photogrammétrie et du balayage optique est liée à deux causes, d'une part elles ont toutes les deux basées sur les principes de l'optique visible et d'autre part elles sont concurrentielles, ce qui oblige les constructeurs à les aligner l'une à l'autre.

La complémentarité est déjà mise en place par l'intégration des photographies dans le nuage de points par exemple.

De plus la diversité d'origine des données est l'archétype même de la complémentarité. La façon de produire les données les différencie encore. En Photogrammétrie la signification des photos par rapport à l'objet est très grande instantanée alors que pour le Laser, les informations dimensionnelles sont facilement obtenues mais il reste de grandes ambiguïtés quant à l'interprétation (avant la segmentation). L'utilisation conjointe des deux procédés permet d'imaginer l'apport d'une interprétation plus aisées des données.

Il reste à noter la différence dans le traitement des données ; en laser de nombreuses phases sont automatiques alors qu'en photogrammétrie l'intervention de l'opérateur est prédominante. La combinaison viserait à limiter l'intervention de l'opérateur et augmenter ainsi la proportion de l'automatisation.

La combinaison des techniques est donc envisageable, notre approche, telle qu'elle a été décrite⁴¹ sera synthétisée⁴² pour constater l'apport de notre travail sur le problème.

2.5.2. Le nuage de points comme convergence des types de données de sortie

La concurrence technologique entre les deux procédés favorise aussi une convergence des types de données.

La répartition régulière des données dans le nuage de points issus du scanner laser est due à l'entière automatisation de l'acquisition. On peut noter l'existence de jeux de données semblables en photogrammétrie aérienne. La génération de points automatiquement est possible grâce à la condition normale des prises de vue. Un Système comme KLT fournit donc un nuage de points. La photogrammétrie architecturale pourrait bientôt en bénéficier. Le nuage de point est ainsi une forme de données visée par la recherche en photogrammétrie. Notre investigation peut ainsi se baser sur le nuage de points comme forme courante de données dimensionnelles.

⁴¹ Cf. §1.2.5

⁴² Cf. §5.1

3. Troisième partie : modélisation d'ouvrage architectural

L'exposé des moyens techniques appropriés au relevé externe des ouvrages bâtis démontre que la combinaison de la photogrammétrie et du scanner optique ne permet pas d'obtenir une représentation géométrique complète. Il en résulte que la mesure, à elle seule, ne suffit pas à définir une représentation tridimensionnelle dans son intégralité. L'apport des connaissances véhiculées autour d'un ouvrage bâti offre cependant la possibilité d'y parvenir. Celles-ci sont accessibles non par la documentation dimensionnelle mais grâce à la documentation écrite : la documentation dans son acception originale.

Il s'agit dès lors de définir et de décrire les concepts liés à ces principes de documentation afin d'aborder la notion de représentation de l'architecture. L'intégration de ces différents types de documentation (écrite et dimensionnelle) au relevé architectural nécessite un processus de modélisation scientifique. Cela permettra ainsi d'exposer les principes de modélisation que nous entendons mettre en place ; principes dépendants du centre d'intérêt de notre recherche : l'ouvrage bâti.

3.	Troisième partie : modélisation d'ouvrage architectural _____	109
3.1.	Documentation d'ouvrage architectural _____	113
3.1.1.	Documentation _____	113
3.1.1.1.	Regroupement / acquisition _____	113
3.1.1.2.	Collection / catalogue _____	114
3.1.1.3.	Synthèse/Complétude _____	114
3.1.1.4.	Documentation dimensionnelle _____	114
3.1.1.5.	Documentation informatique _____	115
3.1.2.	Ouvrage architectural _____	115
3.1.2.1.	Rapport pragmatique à l'esthétique _____	115
3.1.2.2.	Artefact technologique _____	115
3.1.2.3.	Résultat d'un processus de conception _____	116
3.1.2.4.	Informations sur l'ouvrage architectural _____	116
3.1.3.	Informations et données relatives aux ouvrages bâtis _____	117
3.1.3.1.	Documentation antérieure _____	117
3.1.3.2.	Documentation analytique _____	118
3.1.3.3.	Documentation générale _____	119
3.2.	Représentation du bâti _____	120
3.2.1.	Perception visuelle comme moyen de globalisation _____	120
3.2.1.1.	Rapport à la vue _____	120
3.2.1.2.	Interface de travail _____	120
3.2.1.3.	Traduction d'éléments non visualisables _____	121
3.2.2.	Communication d'un modèle tridimensionnel _____	121
3.2.2.1.	Visualisation _____	122
3.2.2.2.	Représentation _____	122
3.2.3.	Exploitation d'une représentation _____	122
3.2.3.1.	Normes de représentation _____	123
3.2.3.2.	Niveau de détail _____	124
3.2.3.3.	Outils numériques de représentation tridimensionnelle. _____	124
3.2.3.4.	Normalisation de la modélisation tridimensionnelle ? _____	125
3.3.	Modélisation d'ouvrage _____	126
3.3.1.	Définition _____	126
3.3.1.1.	Abstraction de la réalité _____	127
3.3.1.2.	Utilisation courante _____	127
3.3.1.3.	Notion de Modèle architectural _____	127
3.3.1.4.	Complexité et Complication _____	128
3.3.2.	Document ou modèle ? _____	130
3.3.2.1.	Typologie d'emploi de modèles tridimensionnels _____	130
3.3.2.2.	Limites de l'acquisition dimensionnelle _____	134
3.3.2.3.	Intérêt de la modélisation architecturale, modélisation à tout prix ? _____	134
3.3.2.4.	Organisation de la documentation ? _____	135
3.4.	Préambule à l'élaboration d'un principe de modélisation architecturale _____	136
3.4.1.	Types de modélisation _____	136
3.4.1.1.	Modélisation impérative _____	136
3.4.1.2.	Modélisation déclarative _____	137
3.4.1.3.	Modélisation fonctionnelle _____	138
3.4.1.4.	Positionnements pour un processus de modélisation géométrique _____	138
3.4.2.	Caractéristiques du modèle _____	139

3.4.2.1.	Modèle relationnel _____	139
3.4.2.2.	Modèle dimensionnel _____	140
3.4.2.3.	Positionnement par rapport à la nature de la géométrie _____	141
3.4.3.	Gestion de la complexité et de la complication _____	141
3.4.3.1.	Phénomène réduit : complexité circonscrite _____	141
3.4.3.2.	Processus par étapes _____	142
3.4.4.	Gestion de la documentation _____	142
3.4.4.1.	Utilisation des différents types de documents _____	142
3.4.4.2.	Base de données _____	143
3.4.4.3.	Relation base / géométrie _____	143
3.5.	Conclusion sur la modélisation d'ouvrage architectural : _____	143

3.1. Documentation d'ouvrage architectural

La documentation fait partie de notre champ d'investigation sous son aspect de regroupement thématique d'informations liées aux ouvrages architecturaux. La combinaison de techniques d'acquisition permet, certes, d'améliorer la documentation dimensionnelle d'un bâtiment lors d'un relevé, mais certaines parties de façade ne peuvent néanmoins être relevées. Ceci est en partie dû aux effets de masques précédemment observés. La documentation, perçue d'un point de vue plus général, peut aider à recouvrer ces manques par des hypothèses liées aux connaissances architecturales.

Afin de faire le point sur ce que peut nous apporter cette nouvelle approche, il convient tout d'abord de développer cette notion de documentation, d'appréhender par la suite l'ouvrage architectural lui-même, et enfin de décrire les informations liées aux bâtiments.

3.1.1. Documentation

Le terme de documentation est très utilisé quand on traite de sauvegarde et de relevé d'ouvrages bâtis, il est cependant rarement défini. On pourrait en déduire que son sens est implicite, ce qui n'est pas le cas. Il convient d'abord de définir ce terme en dehors de tout contexte.

« Ensemble de documents - ensemble des opérations de tri, de classement, de recherche, de diffusion de documents » [UNI04]

« Recherche de documents pour appuyer une étude - Ensemble de documents relatifs à une question. » [ROB01]

La documentation est un ensemble, un groupe d'éléments, d'ouvrages concernant un objet particulier. Ce regroupement est volontaire et fait souvent partie d'une collection (centre de documentation par exemple).

3.1.1.1. Regroupement / acquisition

La documentation est le résultat d'un rassemblement d'informations autour d'une thématique particulière. On a cherché à obtenir ces informations de façon méthodique afin de connaître, à tout moment, l'état de la documentation. L'acte de documenter peut être également producteur d'informations, dans le cas où celles-ci n'existeraient pas encore, et constitue ainsi un nouveau témoignage vis-à-vis du

sujet concerné. La documentation permet en partie la représentation et la connaissance du sujet, alors que l'acte de documenter consiste en une réunion.

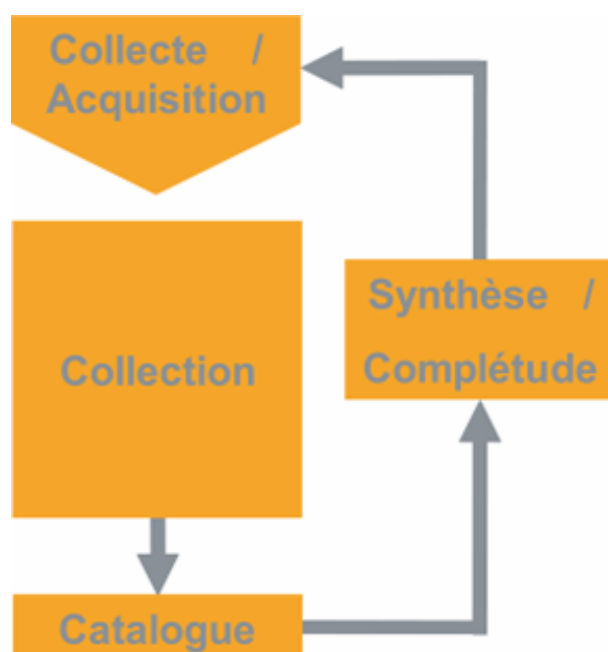
3.1.1.2. Collection / catalogue

Le résultat d'une documentation constitue une collection d'ouvrages ayant un thème commun, c'est un ensemble cohérent. La collection induit de même les notions d'accumulation et de redondance des ouvrages, mais aussi de multitude et de différence. Elle nécessite un catalogue, à savoir une liste ordonnée pour permettre la gestion des objets regroupés.

3.1.1.3. Synthèse/Complétude

Le catalogue est un des premiers éléments de synthèse permettant un recul sur la documentation, et qui ouvre les perspectives d'utilisation de la collection d'ouvrages. De fait, la documentation est vouée à l'utilisation, c'est sa manipulation qui permet la réutilisation du savoir engrangé, ou sa complémentation. Il est toujours intéressant de connaître l'état de la documentation pour savoir s'il est nécessaire de l'enrichir, de la compléter ou d'y ajouter d'autres spécimens.

3.1.1.4. Documentation dimensionnelle



Dans le domaine de l'acquisition de données tridimensionnelles, la documentation consiste à relever l'objet et à formaliser les informations produites en fonction de la demande (statuts du CIPA)⁴³[CIP04]. Les données sont stockées et manipulées sur support informatique dans différents systèmes.

Figure 29 : la documentation : fabrication et complémentation

⁴³ CIPA will: « Establish contacts with and between the relevant institutions and companies that specialise in the execution of recording, documentation and measurement of cultural goods or in the manufacture of appropriate systems and instruments».

3.1.1.5. Documentation informatique

L'usage de l'informatique pour la documentation relève de deux éléments :

- une efficacité dans la gestion d'informations de toutes sortes (base de données), qui mène à la numérisation des ouvrages et des supports visuels (photographies par exemple)
- une prééminence de la nature des données contemporaines qui sont le plus souvent numériques.

L'informatique est ainsi l'outil de convergence de toutes les informations, soit par mise à niveau (numérisation), soit parce que les données produites sont déjà numériques.

L'utilisation numérique de l'information rend également possible la gestion du savoir, ce qui tend vers une capitalisation sur les connaissances⁴⁴.

3.1.2. Ouvrage architectural

En première partie (§1.1.4) nous avons abordé le type d'ouvrages architecturaux concernés par notre étude. Il s'agit dès lors de détailler les caractéristiques d'un bâtiment de ce type.

3.1.2.1. Rapport pragmatique à l'esthétique

Dans le domaine de la documentation dimensionnelle de l'architecture, la vision du monument est d'autant plus superficielle que les rapports à celui-ci sont extérieurs du point de vue des connaissances. Le bâtiment a une valeur patrimoniale de par son caractère ancien (Valeur d'ancienneté, voir partie 1, §2), il possède donc une valeur esthétique, et le relevé dimensionnel de l'ouvrage permettra d'en récupérer la valeur patrimoniale. Ce rapport à l'architecture est assez répandu socialement, car l'architecture concerne chacun par le fait qu'elle nous entoure [CHA80].

3.1.2.2. Artefact technologique

L'ouvrage architectural est un artefact : c'est un objet réalisé par l'homme. Il s'agit d'une organisation de matériaux selon des règles établies par l'expérience et le savoir-faire. Le bâtiment est le fruit de connaissances, mais également, dans nombre de cas, la reproduction partielle d'autres ouvrages. Il résulte ainsi d'une convergence

⁴⁴ Capitalisation sur les connaissances : La capitalisation sur les connaissances est la pratique de renforcement et d'exploitation du capital intellectuel pour faciliter l'innovation.. [BAR02]

de domaines lentement mise en place : techniques constructives et sciences des matériaux. Le bâtiment, avant même d'être reconnu comme monument, est directement lié à la culture, il en est un produit du fait de sa construction.

3.1.2.3. Résultat d'un processus de conception

Plus un artefact est complexe, plus sa réalisation demande de l'anticipation. La conception d'un ouvrage architectural est le moyen de permettre une mise en œuvre la plus efficace possible. La conception architecturale correspond à la période d'énonciation des règles de composition et de construction du bâtiment. Il s'agit de déterminer ses dimensions générales et la position des éléments constitutifs essentiels, puis de rendre le programme de départ fonctionnel, par la répartition logique et raisonnée des espaces. Le bâtiment fini s'avère le résultat de cette phase d'anticipation qu'est la conception architecturale. Il intègre, en lui, les caractéristiques combinées de sa genèse.

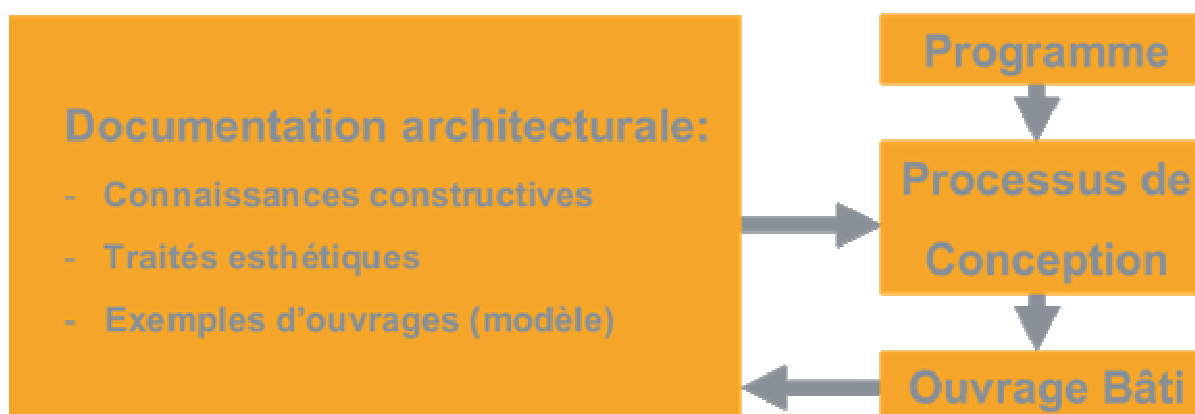


Figure 30 : utilisation et enrichissement de la documentation architecturale

3.1.2.4. Informations sur l'ouvrage architectural

En deuxième partie, sont exposées les possibilités modernes de documentation dimensionnelle d'un bâtiment. Nous avons préalablement observé qu'elle est intégrée à un ensemble plus important : la documentation globale de l'ouvrage⁴⁵. Celle-ci, appliquée au sens large au monument historique, peut être étendue au-delà de la simple documentation dimensionnelle. Le bâtiment résultant d'un long processus intellectuel, il est envisageable de trouver des traces écrites, des documents relatifs à l'esprit de la conception de cette époque, [VIT96] et [ALB1553] pour les plus anciens. De plus, le caractère patrimonial des ouvrages qui captent

⁴⁵ Cf. §1.1.4 de cette partie.

notre attention participe à l'enrichissement de la documentation en rapport à ces monuments [CHA80, CHO92]. Des ouvrages généraux sur la description sémantique de l'architecture [VIG92] et sur les principes de sa composition [PER93] permettent d'acquérir et de manipuler des connaissances étendues relatives aux bâtiments. Les éléments visibles qui les constituent peuvent alors être nommés, qualifiés, décomposés. Ainsi, on constate qu'il est aisé de disposer de documents et de connaissances liés à un monument précis complétant la documentation dimensionnelle que l'on peut acquérir.

3.1.3. Informations et données relatives aux ouvrages bâtis

La documentation écrite⁴⁶, relative aux ouvrages bâtis ou à l'architecture en général, est une source d'information complémentaire aux données dimensionnelles. Il faut prendre en considération un côté explicite des connaissances ; ce qui amène à ce poser la question relative aux origines des connaissances à utiliser. La documentation écrite peut être divisée en trois types : la documentation existant au moment de la conception de l'ouvrage, la documentation créée à partir de l'ouvrage et la documentation générale sur l'architecture.

3.1.3.1. Documentation antérieure

La documentation antérieure nous donne la possibilité de saisir la doctrine du concepteur d'un ouvrage. Il s'agit des documents théoriques et dogmatiques⁴⁷ qui constituaient une partie des références architecturales de l'époque de la construction du bâtiment ; s'y trouvent les règles à appliquer, les considérations esthétiques et les modèles suivis lors de la conception architecturale. Leur utilisation, dans le but de restituer la géométrie d'un ouvrage, nécessite de prendre en compte l'époque de construction de l'ouvrage : le caractère ancien du bâtiment réduit d'autant la quantité, mais aussi la fiabilité des sources exploitables. En effet, la non-pérennité du document écrit explique la raréfaction des sources les plus anciennes. La fiabilité s'avère plus difficile à définir ; surtout, elle modifie considérablement la crédibilité de ce type de documentation. Ces écrits, produits autour de l'architecture, se révèlent souvent dogmatiques, et doivent donc être considérés comme un apport documentaire, non comme une source sûre de connaissances. Prenons l'exemple

⁴⁶ Documentation écrite : pour la distinguer de la documentation dimensionnelle.

⁴⁷ Dogmatique : Qui exprime ses opinions d'une manière péremptoire (Qui détruit d'avance toute objection) [ROB01]

des dix livres de Vitruve, *De l'architecture* [VIT96], référence utilisée, dès la Renaissance, dans le domaine de l'architecture classique. On ne peut pas attribuer de qualité intrinsèque à une œuvre sous prétexte qu'elle est la seule de cette époque à nous être parvenue [GRO04]⁴⁸, elle constitue néanmoins un témoignage quant aux techniques de construction grecques et latines. La crédibilité des sources écrites ne doit pas remettre en cause leur utilisation à l'époque : son statut de référence maintient sa valeur documentaire relative à la conception de l'ouvrage.

Les connaissances historiques permettent aujourd'hui de mettre en doute la crédibilité des savoirs véhiculés par certaines sources écrites, mais l'usage qui en a été fait lors de la conception de l'ouvrage génère son rôle documentaire dans le cadre de notre recherche.

3.1.3.2. Documentation analytique

La documentation analytique est constituée de documents induits par l'ouvrage réalisé. Le bâtiment, une fois terminé, contient une connaissance encapsulée et recouvrable par l'analyse, une information qui résulte d'une investigation méthodique. Cette enquête correspond donc à une recherche de logique de conception, il s'agit d'un travail de traduction des principes de composition révélés par la façade. Celui-ci consiste en une décomposition raisonnée de la partie extérieure⁴⁹ de l'ouvrage ; cette décomposition peut être thématique : analyse de la volumétrie (niveaux et corps de bâtiments), étude stylistique⁵⁰ ou structurelle⁵¹ par exemple.

⁴⁸ « Vitruve est l'auteur du seul traité complet d'architecture qui ait échappé au naufrage de la littérature technique grecque et latine. Cette circonstance explique le contraste entre l'extraordinaire importance accordée à son œuvre, depuis le temps de Charlemagne jusqu'à celui de Viollet-le-Duc, et la modestie de sa situation historique réelle. On ne saurait donc prendre pour un signe d'excellence un isolement qui n'est dû, en grande partie, qu'aux lacunes de la tradition. Mais on ne doit pas céder pour autant à la tentation de refuser toute crédibilité à un praticien qui, certes, n'a pas joué le rôle d'initiateur et de codificateur que d'aucuns voulurent lui reconnaître, mais qui a eu le mérite de réunir en un tout cohérent le vaste trésor d'expériences et de connaissances, accumulé avant lui par les bâtisseurs hellénistiques. C'est dire que l'analyse du contenu de *De architectura* est inséparable d'une exacte localisation de son auteur dans l'univers culturel et technique de son temps, et d'une réflexion méthodologique sur les règles d'un « genre », le traité théorique, plus contraignantes qu'on ne l'a cru souvent »

⁴⁹ Dans le contexte de notre étude.

⁵⁰ Qu'est ce qui constitue l'appartenance de l'ouvrage à un style architectural donné.

⁵¹ Examen de contrefort, relevé du fruit d'un soubassement ou encore analyse des descentes de charges.

3.1.3.3. Documentation générale

La documentation générale se compose d'éléments qui regroupent de façon exhaustive⁵² les éléments d'une thématique. Il peut s'agir de traités, de méthodes, de glossaires ou d'index.

L'ouvrage de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Principes d'analyse scientifique : architecture* [PER93], peut être considéré comme représentatif de ce type de documentation. Il s'agit d'un produit de l'inventaire général qui consiste en une méthode de description du patrimoine architectural. On y trouve le vocabulaire lié aux éléments d'architecture ainsi que les illustrations correspondantes. Ce travail est basé sur un très grand nombre d'ouvrages écrits, dont le *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle* d'Eugène Viollet-le-Duc [VIO67], synthèse des connaissances relatives au patrimoine architectural.

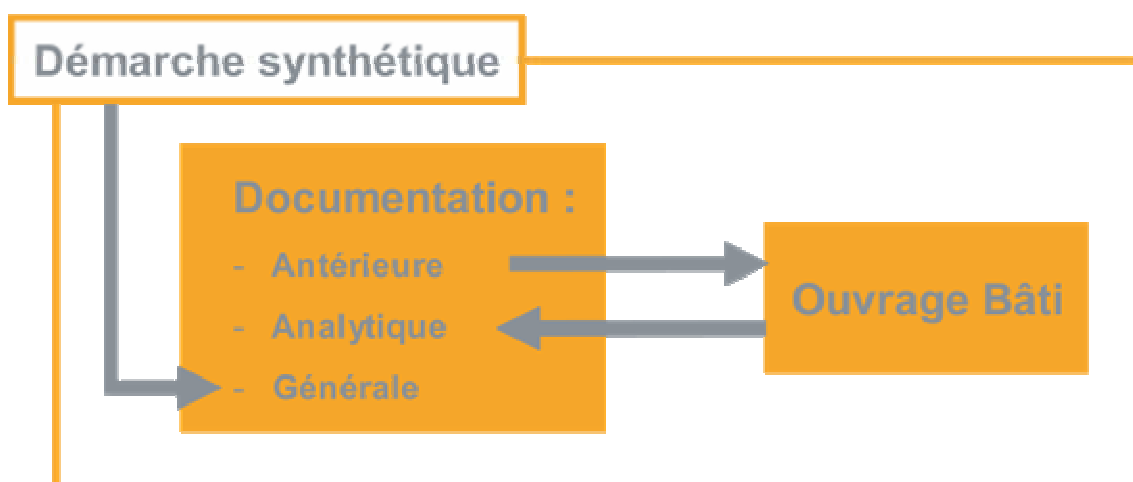


Figure 31 : différents types de documentation écrite traitant d'architecture

Le Dicobat [VIG92] peut être également cité à titre de documentation générale, en tant que dictionnaire de l'architecture utilisé par les architectes contemporains : il consigne le vocabulaire architectural courant. Son utilisation dans le cadre de notre étude est liée à la continuité des connaissances architecturales au fil du temps. Il n'existe pas de rupture dans la tradition constructive ; les termes employés jadis pour nommer certains éléments le sont encore aujourd'hui, ce qui prouve la permanence de l'utilité de ce dictionnaire.

⁵² Il faut prendre en compte la relativité de la notion d'exhaustivité quand nous considérons le rapport au passé de la documentation. L'exhaustivité d'une étude du XIX^{ème} siècle est nécessairement différente de celle d'une étude contemporaine.

3.2. Représentation du bâti

Après avoir considéré le rapport de notre travail avec la notion de documentation dans son acception générale, nous allons nous préoccuper de la manière de communiquer des informations relatives à un ouvrage architectural. La représentation du bâti est un des points essentiels de notre étude qu'il s'agit de développer. Nous traiterons dans un premier temps de l'importance du rapport à la vue pour la communication de l'architecture, puis de la façon la plus pertinente pour notre étude de représenter le relevé de bâtiment ; enfin, des outils permettant la mise en place de cette représentation.

3.2.1. Perception visuelle comme moyen de globalisation

Dans l'approche de la documentation globale d'ouvrage bâti, il importe de considérer le moyen d'enregistrement de cette combinaison que nous tentons d'élaborer. Etant donné que nous ne considérons que l'enveloppe extérieure du bâti, il convient de mentionner la perception globale que représente la vue sur l'ouvrage.

3.2.1.1. Rapport à la vue

Le rapport à la vue pour la perception de l'architecture est capital ; il s'agit aussi d'un élément majeur de l'action de conception. La vue s'avère le moyen de penser l'architecture, par la figuration qui s'opère pendant la conception architecturale [TID96]. Il est presque trop évident que l'utilisation d'un moyen de communication visuel s'impose à nous pour notre travail, tant l'œil occupe une place dominante dans notre civilisation. De plus le mode de pensée est lié au outils de travail : plus on utilise des supports visuel, plus la réflexion en nécessite ; ce lien se renforce et s'entretient au fil de la pratique. Nous allons essayer dans les pages qui suivent de qualifier le rôle de la communication visuelle dans le cadre de notre recherche.

3.2.1.2. Interface de travail

L'écran constitue la principale interface de travail en informatique : il contrôle tout ce qui doit être validé, vérifié. Le rapport à la vue est là aussi primordial, l'organisation et l'enregistrement de la combinaison de documentations passeront donc par l'interface visuelle. La consultation des différents types de documents disponibles est déjà possible par ce biais, si l'on considère comme acquise la tendance à la numérisation des documents préexistants à l'avènement de l'informatique.

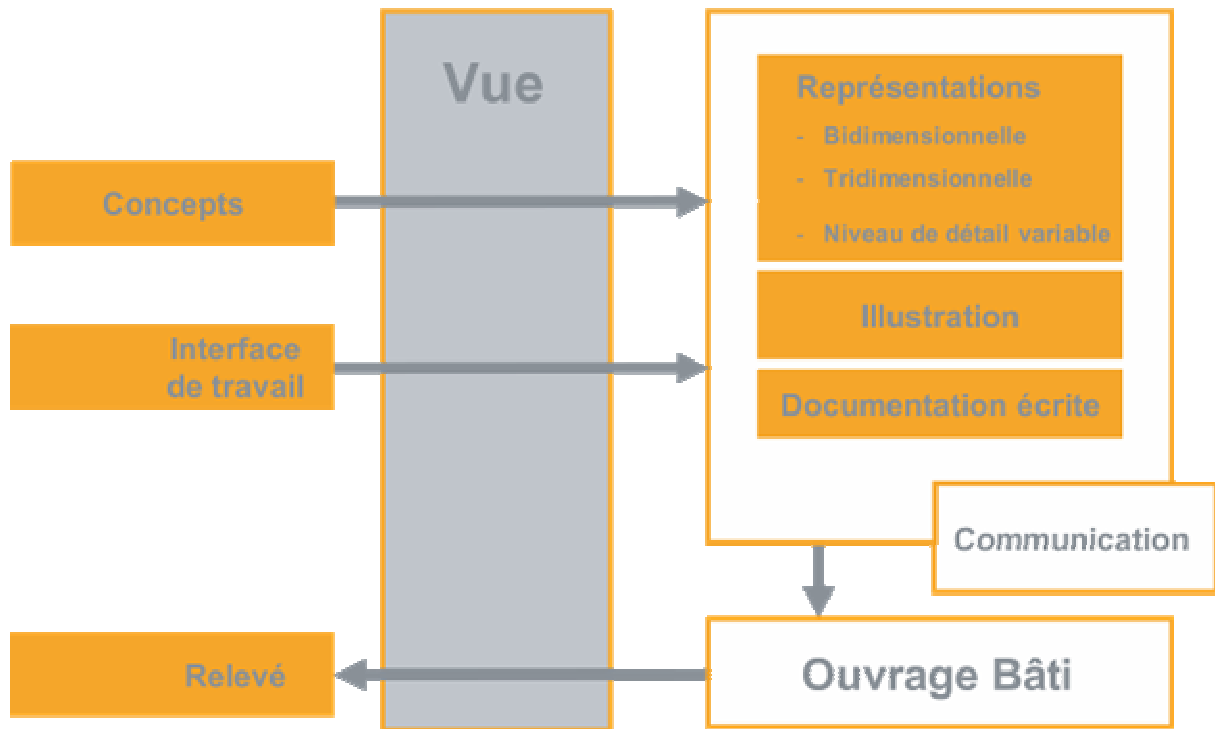


Figure 32 : la vue comme élément central à la représentation de l'architecture

3.2.1.3. Traduction d'éléments non visualisables

Chaque type de documentation (géométrique, écrite, photographique) peut être consulté de façon autonome ; cependant, lorsqu'il s'agit de rendre accessible un document par rapport au mode de communication d'un autre, on se heurte à un problème d'ordre téléologique⁵³ [TID96]. Chaque document possède sa propre finalité : il paraît donc difficile de les utiliser dans leurs formes finales dans l'intention d'en combiner plusieurs. Chaque type de document relatif à un ouvrage architectural particulier contient un message, une signification dont il est le vecteur, et c'est la connaissance contenue dans le document qui nous intéresse particulièrement. La différence de nature des documents les rend imperméables entre eux quand il s'agit de mettre en commun les connaissances qu'ils contiennent : on constate de ce fait une encapsulation des connaissances. Le problème qui se pose ainsi concerne la prise en compte de l'ensemble des connaissances véhiculées par des documents de natures incompatibles, mais aussi l'élaboration d'une synthèse cohérente.

3.2.2. Communication d'un modèle tridimensionnel

La communication de l'architecture est un thème majeur pour les architectes concepteurs [TID96], ce qui pose, dans le cadre de notre étude, la question de la

⁵³ Qui constitue un rapport de finalité [ROB01]

visibilité de toute la documentation relative à un monument. On peut dès lors diviser la communication de l'architecture en deux actions : faire voir et donner à comprendre.

3.2.2.1. Visualisation

La visualisation correspond au fait de rendre visible tout phénomène, elle relève essentiellement d'une considération technologique. Quels moyens employer pour observer un phénomène ? Dans notre cas, visualiser un bâtiment ne paraît pas une prouesse dès lors que l'on maîtrise les interfaces graphiques, et qu'elles se trouvent intégrées à une quasi-totalité des outils informatiques. La tâche relative à la visualisation, pour ce qui est de notre étude, consiste à rendre visible un maximum d'éléments consignés dans la documentation écrite.

3.2.2.2. Représentation

La représentation est une visualisation codifiée. Il faut en connaître les règles pour la pratiquer, aussi bien lors du dessin que lors de la lecture. Représenter un objet signifie le rendre intelligible dans un univers de codifications particulières. L'architecture se trouve généralement représentée en deux dimensions, et plusieurs types de documents sont identifiables : plans, coupes et élévation notamment. La troisième dimension dans la représentation a longtemps été possible exclusivement par le biais de maquettes à échelle réduite. Les outils informatiques permettent un travail direct en trois dimensions, tant pour la figuration lors de la conception, que pour la représentation (au moment de la finalisation). De plus, les techniques d'acquisition à distance appliquent la troisième dimension dès la mesure ; la représentation tridimensionnelle de la documentation architecturale en est une synthèse fidèle.

3.2.3. Exploitation d'une représentation

La représentation possède un caractère téléologique : dans le cadre de notre étude, elle est destinée à communiquer la combinaison de la documentation d'un ouvrage bâti. La représentation homogène de la documentation est un objectif à atteindre pour nous et un outil par rapport au contexte patrimonial décrit en première partie (cf. §2.3.). Le type de représentation de l'ouvrage résultant de notre étude doit être utilisable, d'une part pour permettre sa manipulation, d'autre part pour pouvoir éditer les informations qui y seront liées.

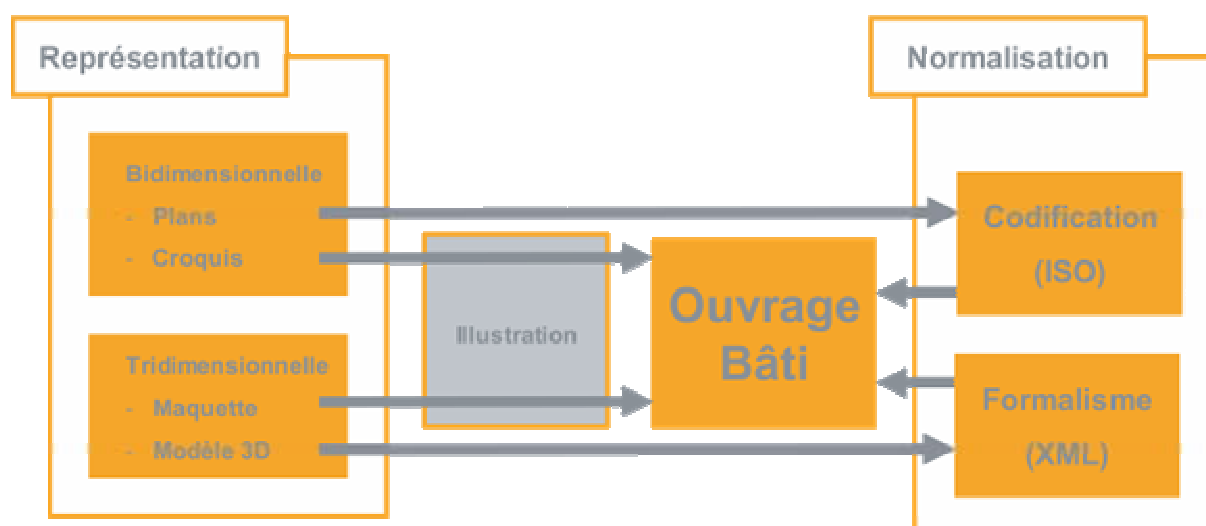


Figure 33 : exploitation d'une représentation d'ouvrage bâti

3.2.3.1. Normes de représentation

La représentation constitue l'aspect réglementaire de la communication et pose la question de la compréhensibilité. Il s'agit de faire en sorte qu'un dessin, qu'un croquis soit le plus compréhensible possible, que l'équivoque par rapport au sens transmis soit réduite au minimum : la représentation est donc soumise à des normes⁵⁴. Mais malgré la normalisation, en architecture, le texte seul a valeur légale. En effet, l'architecte doit remettre, en accompagnement de ses dessins, le descriptif complet et rédigé de son projet lorsqu'il le soumet aux entreprises. La représentation tridimensionnelle vers laquelle nous tendons n'est pas normalisée dans son état visualisable, mais dans la forme des fichiers de données la décrivant. Les langages de description d'objets tel que le XML sont spécifiés et on arrive à la possibilité de description d'un ouvrage bâti. Ils constituent un vecteur de l'information par la standardisation de l'enregistrement ; les données sont formalisées et exploitables, mais l'interface de compilation des informations non définie. Pour ce qui est de notre recherche, nous allons nous intéresser à la façon de combiner différents types de documentations et de produire une représentation la plus efficace possible par rapport aux potentiels de son utilisation, tout en laissant la possibilité de l'enregistrer sous une forme standardisée efficace.

⁵⁴ Le dessin technique est régi par la norme ISO 128 intitulée : Dessins techniques - Principes généraux de représentation.

3.2.3.2. Niveau de détail

Les ouvrages bâtis sont représentés à une certaine échelle, en fonction de laquelle on ne communique pas la même information, bien que se trouvant toujours liée au bâtiment [SAI92]. Au 1/500^e, on représente l'implantation du bâtiment par rapport au tissu urbain environnant, et l'échelle 1/20^e permet de distinguer par exemple le détail de la corniche d'une façade. L'échelle d'une représentation se définit en fonction de la taille du document final qui sont des plans dans les exemples ci-dessus. Si la représentation est numérique, comme un modèle tridimensionnel, la possibilité d'agrandir la partie visualisée change la notion d'échelle relative au document final. La notion de finesse de la représentation est notifiée par le niveau de détail du modèle, correspondant à l'échelle suivant laquelle on veut qu'il soit défini.

3.2.3.3. Outils numériques de représentation tridimensionnelle.

Nous sommes là au cœur de l'évolution de la représentation tridimensionnelle. Tout comme la logique binaire avait été développée bien avant l'arrivée du premier ordinateur, la modélisation solide a déjà été théorisée avant que les stations de travail les plus puissantes ne puissent encore la manipuler. Elle procède par énumération spatiale de particules de matière nommées voxels, traduction directe du pixel bidimensionnel. Elle s'avère la représentation idéale des matériaux, et on peut y adjoindre des propriétés de densité ainsi que de transparence. La modélisation solide commence à être utilisée, mais sa généralisation dépend de l'augmentation des performances de calcul. C'est pourquoi la représentation tridimensionnelle utilise des « artifices » de représentation dans un but de ressemblance avec la 3D solide. Au tout début de la visualisation d'objets tridimensionnels, on ne possédait que la représentation « fil de fer ». La représentation « lignes cachées » a nettement amélioré le rendu interactif, pour ensuite évoluer sans cesse et aboutir aux représentations par frontière (B-Rep), au comportement similaire à la modélisation solide (autorise les opérations booléennes sur les solides par exemple), mais gérant uniquement les faces qui limitent les objets représentés. Pour garder une relation avec la modélisation solide on utilise la géométrie de construction de solides (CSG), représentation de l'arborescence relative à la déformation de primitives géométriques simples à l'aide d'opérations booléennes ; le résultat est converti en B-Rep. La représentation B-rep n'est plus une performance, mais une nécessité permettant une visualisation de la 3D.

3.2.3.4. Normalisation de la modélisation tridimensionnelle ?

Les différents logiciels ont ainsi chacun leur moteur de représentation tridimensionnel, en attendant la 3D solide. La maturité d'une technologie facilite grandement sa normalisation et les standards qui en découlent. On peut s'attendre à la normalisation de la représentation tridimensionnelle lorsque le palier attendu avec la gestion de la modélisation solide sera atteint. De fait, les possibilités qu'elle offre nous permettent d'imaginer qu'elle répondra de façon plus efficace aux préoccupations actuelles de modélisation tridimensionnelle, et laissera entrevoir de nouvelles perspectives de modélisation.

3.3. Modélisation d'ouvrage

Nous venons d'aborder les moyens de représenter un ouvrage architectural, dont la représentation finale est l'aboutissement du processus de fabrication. Le modèle tridimensionnel, dans notre cas, permet de reproduire le relevé extérieur d'un monument. Il s'agit dès lors de discuter de la nature du modèle tridimensionnel, d'un point de vue formel et conceptuel. Derrière la représentation se situe un processus de modélisation complexe, synthèse de notre investigation. Les notions liées au modèle scientifique et à la démarche de modélisation, définies en premier lieu, seront ensuite confrontées à nos réflexions.

3.3.1. Définition

Le terme « modélisation » s'avère central dans cette étude : la modélisation consiste avant tout en un acte scientifique. Mais le terme étant très employé sous différentes acceptions, comme pour le terme « documentation », nous avons tenté d'en établir une définition générale, afin par la suite d'en donner une acception spécifique au contexte de notre recherche.

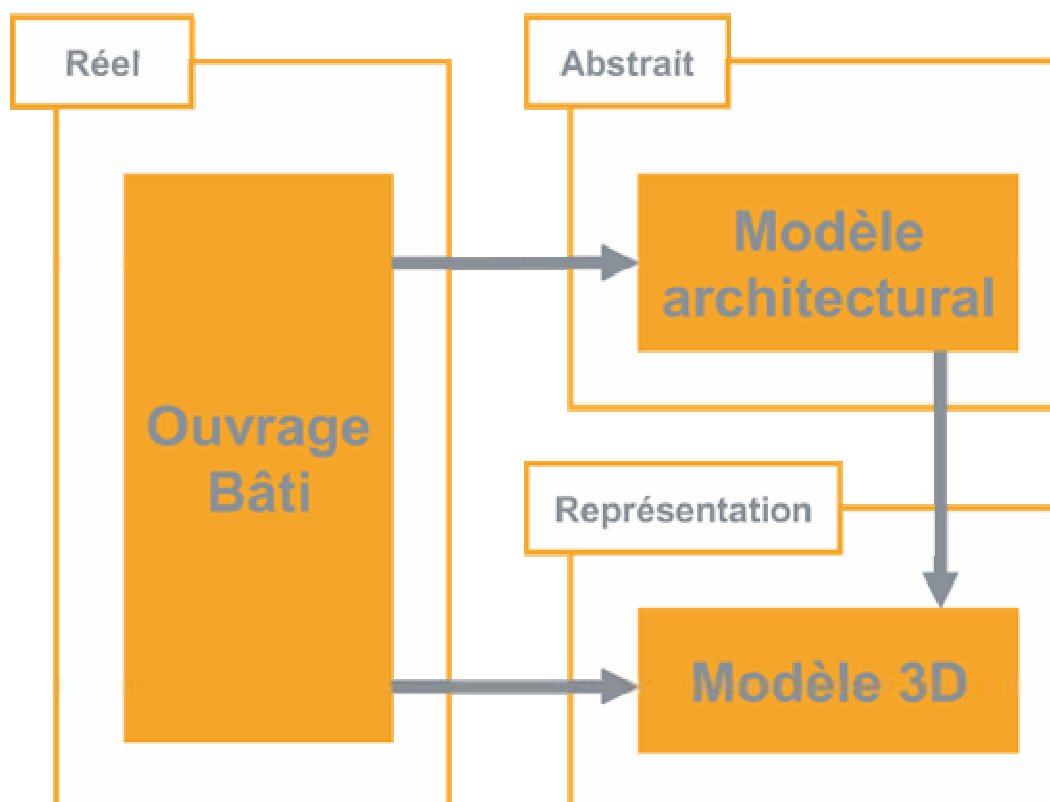


Figure 34 : ouvrage bâti, rapport à la modélisation et à la représentation

3.3.1.1. Abstraction de la réalité

D'un point de vue scientifique, la modélisation est une abstraction de la réalité pour permettre l'étude de l'objet réel [Mou04]. L'objet réel que l'on étudie possède des caractéristiques qui lui sont propres : on relève, étudie et analyse celles qui nous intéressent, puis celles-ci sont organisées de manière à pouvoir les manipuler indépendamment de l'objet, et que les résultats des opérations effectuées se révèlent analogues à ce que l'on aurait obtenu de l'objet réel. On crée ainsi un objet virtuel, mais restreint. La modélisation est une analogie réciproque objet réel / objet virtuel basée sur la synthèse et la précision, c'est une mise en relation fidèle et vérifiable entre l'objet et le modèle qui résulte de son appréhension globale et de choix de caractéristiques. La modélisation constitue l'acte d'élaboration du modèle.

3.3.1.2. Utilisation courante

Il faut aussi mentionner l'utilisation courante qui est faite du terme de modélisation dans notre contexte de travail : il correspond à la construction d'un modèle tridimensionnel. Elle est aussi utilisée dans notre terminologie car les deux acceptions sont étroitement liées par rapport à notre étude. Le moyen d'en distinguer le sens est de qualifier les deux occurrences : nous avons ainsi d'un côté le modèle scientifique, pris au sens général en l'occurrence, et de l'autre côté le modèle tridimensionnel. La modélisation tridimensionnelle a déjà été abordée⁵⁵, et est davantage considérée comme une représentation en trois dimensions d'un objet physique.

3.3.1.3. Notion de Modèle architectural

Le modèle est l'aboutissement d'un processus. Ainsi Roger Brunet⁵⁶ [BRU99] définit le modèle comme la «*Représentation formalisée d'un phénomène à des fins d'interprétation*»⁵⁷. La modélisation d'un ouvrage bâti correspond, dans la pratique, à la construction de son modèle formel. Pour modéliser l'architecture, on utilise l'analogie Forme architecturale / Géométrie [HEG03]. Les apparences d'un ouvrage bâti peuvent ainsi être restituées dans une interface géométrique, grâce à laquelle on peut comparer le réel et le virtuel avec aisance, à l'aide des procédés réalistes des

⁵⁵ Cf. § 2

⁵⁶ Roger Brunet : Directeur de recherche émérite en géographie.

⁵⁷ Conclusion d'une conférence prononcée le 24 novembre 1999 et publiée dans le Bulletin de la Société de Géographie de Liège, 2000, n°2, p. 21-30).

interfaces graphiques actuelles (Maya, Sketchup par exemple). L'analogie employée utilise la communication visuelle pour permettre la validation du modèle géométrique.

3.3.1.4. Complexité et Complication

Roger Brunet dresse une définition du modèle scientifique en énumérant quelques dénégations par rapport aux visions péjoratives du modèle : ce principe permet de situer le modèle scientifique. Dans sa conférence, il définit le modèle scientifique dans le contexte géographique (son domaine), analyse que nous adaptons aux ouvrages bâtis.

Le modèle est une simplification et représente une perte d'information. Le niveau de détail n'est pas le même en fonction de ce que l'on cherche à modéliser. Si le niveau de détail du modèle est inférieur à celui de l'objet, certains détails de l'objet ne sont pas visibles. Le modèle ne doit pas être une description de l'objet (Notion de bruit).

Certains modèles sont parfois tellement compliqués qu'ils sont illisibles. Le modèle opère à une échelle donnée du phénomène. Si l'on cherche à exprimer au-delà de cette échelle, on oublie la finalité même du modèle : communiquer. Si l'on assimile le phénomène qui nous intéresse à une boîte noire, la modélisation consiste à la diviser en plusieurs autres plus petites et d'en rationaliser une seule⁵⁸.

La modélisation écarte de la réalité. Cette critique du modèle doit être prise au sérieux, car la réalisation systématique de l'abstraction de la réalité pour mieux l'appréhender provoque son oubli ; au final, le fait que le modèle passe l'épreuve de l'expérimentation relève plus de la coïncidence que de la pertinence. La technicité croissante des processus de modélisation doit être considérée de telle manière que le résultat ne soit pas hors de propos. L'anticipation du résultat par un cadre hypothétique se révèle un moyen d'éviter ce genre d'écueil.

Cette approche de la définition de modèle par circonscription, délimitation, donne à réfléchir sur les deux notions liées au modèle : complexité et complication. Un modèle est l'abstraction d'un phénomène complexe et compliqué. La complication se trouve déjà réduite par l'extraction exclusive des caractéristiques de l'objet nécessaires au modèle. La complexité de l'objet relève de l'imbrication de paramètres, elle s'avère l'essence même du modèle, et c'est souvent pour la comprendre que le modèle est élaboré.

⁵⁸ Thèse de doctorat de Celso Scaletsky [SCA03]

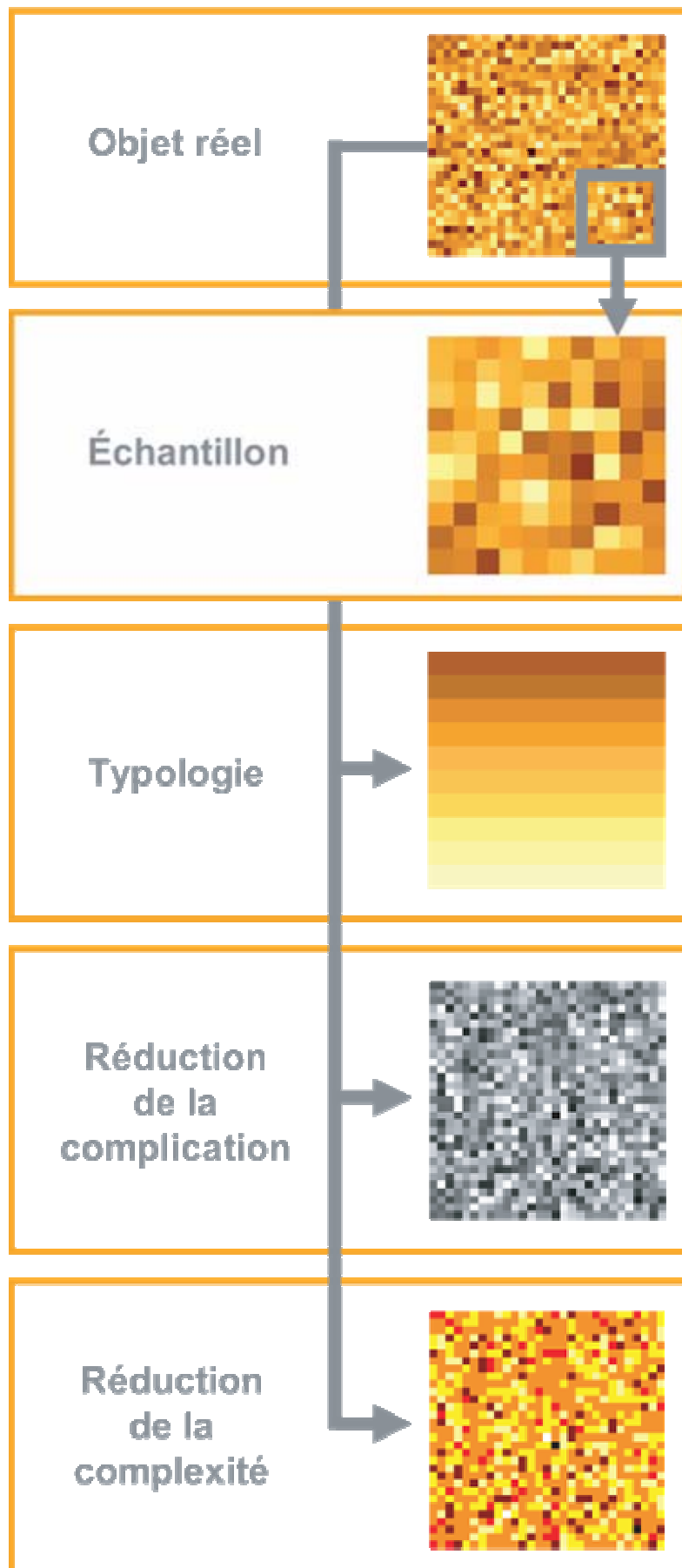


Figure 35 : pistes de modélisation d'un objet réel

3.3.2. Document ou modèle ?

Pour essayer de répondre à la question principale du sujet⁵⁹, il faut aussi considérer ce que l'on va permettre de produire. Le produit fini d'un relevé consiste en une représentation de l'ouvrage, un document. Le modèle, extrait du processus qui l'a créé, est aussi un document ; il garde sa qualité entière à condition de rester dans son contexte de recherche, ou que son utilisation soit interactive. On peut dès lors se demander si la combinaison de documentations de différentes natures devient un document à son tour, si le résultat de notre recherche pourra être consigné en un document, ou encore si l'objectif de notre recherche n'est pas de fournir un outil d'analyse via la combinaison. Ces questions trouveront des réponses suite à l'analyse des types d'utilisations possibles, puis il s'agira de montrer les limites de l'acquisition dimensionnelle en raison de son essence même. Nous tenterons ensuite de présenter l'intérêt de la modélisation architecturale⁶⁰, pour finir par une proposition de relation entre documentation et modèle dans le cadre de notre étude.

3.3.2.1. Typologie d'emploi de modèles tridimensionnels

Les utilisations du résultat envisagé par notre étude sont multiples, car elles dépendent elles-mêmes des motivations diverses de relevé. Le but recherché n'est pas de lister toutes les utilisations possibles, l'ensemble restant ouvert, mais d'en exposer les plus caractéristiques, et d'en déduire les facteurs qui interviennent en fonction des usages d'un modèle d'ouvrage architectural.

Modèle de l'état :

Le besoin correspondant à l'élaboration d'un modèle tridimensionnel de l'état d'un ouvrage à un moment donné découle de l'évolution de sa condition formelle. La forme d'un monument évolue, aussi bien dans son ensemble qu'à une échelle plus réduite. La modification du bâtiment peut être liée à de multiples causes : dégradation, destruction ou réhabilitation. La modélisation de l'état d'un ouvrage entre dans les considérations liées à l'archivage de données. On remarque alors la nécessité de cohérence entre la forme du bâtiment et la géométrie du modèle tridimensionnel. Le relevé avant modification doit offrir la possibilité de reconstruction de l'ouvrage. Il est lié à l'aspect technologique des techniques d'acquisition car la problématique d'une telle tâche correspond à en faire le maximum possible. Une telle

⁵⁹ « Comment s'y prendre ? »

⁶⁰ Modélisation dans l'acception scientifique du terme.

démarche peut éventuellement générer des désordres par rapport au résultat final ; la nécessité de prendre en compte la solution de mesure la plus performante revient à repousser les limites existantes (capacités, précision par exemple), et positionner le relevé dans le cadre de la recherche. Il faut faire en sorte que le modèle produit se montre le plus cohérent possible, la cohérence étant directement liée à l'homogénéité du niveau de détail ; or le besoin d'un maximum de définition provoque certains changements de niveau de détail localisés en fonction des données obtenues. On observe ainsi la nécessité d'un compromis entre précision et cohérence, qui ont tendance à se nuire réciproquement. La recherche de la plus grande précision peut être freinée par l'aspect de l'ouvrage : en effet, la dégradation effective du bâtiment provoque du bruit dans les données par rapport à la géométrie finale. S'il l'on veut garder une relation dimensionnelle stricte entre le bâtiment et le modèle 3D, alors ces bruits sont à conserver et on obtient un modèle tel que saisi (prise en compte de l'époque du relevé puisque la dégradation continue). Si au contraire on souhaite augmenter la cohérence du modèle, on tend vers un modèle tel que construit. On enlève alors les bruits provenant de la dégradation de l'ouvrage [FUC04].

Modèle pour la visualisation :

La visualisation d'ouvrages bâtis se développe, entraînée par les moyens de communication qui la valorisent [MON06]. Les musées virtuels se multiplient sur l'Internet et alimentent la problématique de la visualisation d'ouvrages bâtis. Les contraintes qu'impose la réalité virtuelle diffèrent des considérations de modélisation dimensionnelle. Le réalisme prime sur la précision [ALB05]. Le modèle tridimensionnel doit correspondre aux critères de la représentation interactive, performances de l'affichage, homogénéité du modèle, réalisme, impression d'un haut niveau de détail. Donner au spectateur une sensation de réalisme provoque l'accommodation du modèle à son apparence : pour donner l'illusion de détail, on applique des images détaillées à une géométrie simplifiée (technique du placage de texture). Mais ces images doivent être nettoyées, car certaines parties de l'ouvrage sont abîmées ou cachées, par de la végétation par exemple. L'ouvrage est ainsi idéalisé, et le réalisme renforcé. La visualisation met en avant la valeur d'ancienneté de l'ouvrage, elle représente une partie du rapport entre l'ouvrage et le public, mais les contraintes résultantes dénaturent le modèle dimensionnel.

Modèle pour des besoins spécifiques :

Certaines recherches scientifiques oeuvrant sur les ouvrages bâtis traduisent un besoin de modèles architecturaux. La base du relevé reste la géométrie représentant l'ouvrage, l'analogie forme/géométrie étant très pertinente. Un besoin particulier peut correspondre à l'intégration d'une caractéristique spécifiant le modèle. Lors d'essais d'illuminations, la prise en compte des propriétés des matériaux de façade permet de modéliser le comportement de la lumière notamment [BUR03]. La volonté de produire des images de synthèse nécessite la prise en considération des textures, et engendre ainsi le réalisme [FUC04]. Les modèles finaux ont besoin d'être spécifiés en fonction de l'étude, mais la base reste la même : on peut évoquer la notion de fabrication sur mesure que le modèle diffère considérablement de son aspect géométrique. Les contraintes apportées par la dimension scientifique à ce type de modèle sont donc la polyvalence et la manipulabilité.

Modèle pour la gestion :

Un modèle d'objet architectural, en fonction des caractéristiques qui y sont intégrées, peut servir à la gestion de l'état réel du bâtiment. L'interface graphique sert de système spatial d'interrogation, et permet de consulter les informations relatives aux lieux [GRU06]. Le modèle tridimensionnel est utilisé pour deux de ses caractéristiques : la visualisation, qui permet d'avoir dans la même interface la volumétrie globale et détaillée, et la géo-localisation, qui assure l'accès aux informations liées aux objets.

Modèle pour l'investigation archéologique :

L'archéologie dispose souvent de peu de traces de l'ouvrage : des fondations, des vestiges par exemple. La phase de création du modèle se révèle la finalité du modèle si l'on compare aux utilisations listées ci-dessus. C'est-à-dire que la restitution de l'ouvrage en elle-même correspond à la tâche de l'archéologue. La modélisation utilise en proportion plus d'hypothèses que de données, le modèle obtenu est une validation des postulats. Le modèle ici est constitué à base de quelques références dimensionnelles mises en relation avec des raisonnements fondés sur les connaissances relatives par exemple à la typologie de l'ouvrage. [LAR92].

Ces cinq types de pratique des modèles architecturaux permettent de dégager des critères de qualification d'un modèle architectural.

Niveau de détail :

Le niveau de détail du modèle est une spécification déterminante, qu'il s'agit de préférence de formuler dès le départ.

Précision :

La précision de la modélisation demeure liée aux appareils d'acquisition et influe sur la définition du niveau de détail final.

Rapport entre hypothèses de modélisation et données dimensionnelles :

L'importance que prennent les hypothèses de modélisation par rapport aux données caractérise le modèle de façon significative.

Fidélité à l'ouvrage :

La fidélité à l'ouvrage doit aussi être déterminée au début de la modélisation, les données n'étant pas traitées de la même manière [FUC04]. En effet, si l'on choisit de réaliser un modèle « tel que saisi », on prend en compte l'ensemble des données. En revanche, si la modélisation « tel que construit » correspond à un besoin, les données concernant les zones altérées seront alors considérées comme du bruit.

Polyvalence :

La qualité de polyvalence permet la diversité. Un modèle géométrique polyvalent rend possible l'intégration de propriétés additionnelles.

Intégration de caractéristiques supplémentaires :

L'ajout de caractéristiques supplémentaires à la géométrie renseigne sur l'utilisation ultérieure du modèle : il va être soumis à expérience. Cette spécification est révélatrice de l'expérimentation.

Manipulabilité :

On définit la manipulabilité comme la capacité à être manipulé, une propriété qui tient de l'ergonomie. Un modèle géométrique peut être manipulé en fonction de l'interface dans laquelle il est visualisé. La manipulabilité prend en compte l'accès aux données connexes à la géométrie.

Réalisme :

Le modèle, au delà de l'effet de ressemblance produit par le niveau de détail, peut être réalisé de manière à donner l'illusion de se conformer le plus possible à l'ouvrage architectural.

3.3.2.2. Limites de l'acquisition dimensionnelle

Au-delà des limites liées aux techniques d'acquisition relevées précédemment, le principe de la production d'une représentation géométrique fondée uniquement sur la mesure pose problème. Selon son acception originale, le modèle est une abstraction partielle de la réalité. Par l'utilisation de l'analogie Forme / Géométrie, on préserve cette caractéristique en négligeant entre autres la densité des matériaux et la gravité. La combinaison de techniques d'acquisition ne résout pas tout à fait le problème que chacune pose : le manque occasionnel de données. On peut expliquer la différence entre la documentation et le modèle géométrique en décomposant la nature d'un objet géométrique. La géométrie exprime deux éléments : le rapport des formes entre elles, et leur dimensions. Les techniques d'acquisition n'apportent que l'aspect dimensionnel de la géométrie. Un point n'en voisine un autre que parce que ses coordonnées le spécifient : la relation de proximité topologique n'est pas définie. Le maillage qui découle du nuage de points, par exemple, n'est qu'une représentation supplémentaire.

3.3.2.3. Intérêt de la modélisation architecturale, modélisation à tout prix ?

L'absence d'aspect relationnel dans la représentation produite par les techniques d'acquisition à distance n'est pas visible tant qu'existe une continuité des données, l'analogie Forme/Géométrie aidant à pallier le manque. Les éléments de l'ouvrage ont été disposés de façon logique, mis en relation selon les principes de composition de façade. C'est au niveau des déficits de données que la description des relations entre la partie manquante et le jeu de données permettrait d'obtenir un modèle complet au sens scientifique du terme. Au même titre que la mesure, les relations possibles décrivant les parties manquantes doivent être fiables, vérifiées. Ces relations s'avèrent de différente nature, et sont difficilement déductibles à partir des données elles-mêmes. Les connaissances architecturales, complétées par une documentation précise, rendent possible la mise en hypothèse au sujet de ces

relations, et l'apport d'autres types d'informations constitue une trame relationnelle des entités architecturales à laquelle s'ajoutent les renseignements dimensionnels. On peut citer la sémantique architecturale [LUC02], fondée sur la documentation d'époque, ou encore la logique constructive liée aux connaissances architecturales générales. La différence entre la nature documentaire de la représentation tridimensionnelle du relevé et la modélisation relève de l'introduction de relations entre les éléments géométriques. Les hypothèses concernant ces relations et reposant sur des connaissances architecturales opèrent la transformation de la documentation en modélisation.

3.3.2.4. Organisation de la documentation ?

Dans le cadre du relevé dimensionnel d'un monument, on veut définir le rôle du modèle par rapport à celui de la documentation. La documentation consiste à collecter des données dimensionnelles, elles donnent un aperçu arbitraire de l'objet. Les contraintes techniques d'acquisition sont directement visibles sur les jeux de données. Les couples stéréoscopiques sont pris dans le plan de restitution, quant aux clichés multi-images, ils convergent par défaut. Les nuages de points produits par balayage laser ont des pas réguliers indépendamment des discontinuités de l'objet. En ce qui concerne l'acquisition laser, la mesure a été effectuée sur le terrain : la représentation des données consiste donc en un traitement automatique ou manuel du nuage a posteriori. Cela diffère ainsi de la photogrammétrie, où la mesure se fait en même temps que la représentation. Dans ces deux cas, on applique un processus de représentation aux jeux de données, on parle alors de pertinence de la représentation en fonction de la ressemblance au réel. Les discontinuités de la représentation, directement liées aux problèmes de l'acquisition, soulignent l'absence de phase de modélisation dans l'acquisition dimensionnelle. Le besoin de compléter l'objet virtuel pousse à la combinaison, qui induit la redondance. La gestion de celle-ci force l'analyse, une des caractéristiques du processus de modélisation. Le modèle en est l'organisation, la synthèse des informations relatives à un ouvrage ; il s'agit d'une mise en relation cohérente de l'ensemble des données collectées. La modélisation d'ouvrage bâti est le niveau méta de la documentation dimensionnelle de l'architecture.

3.4. Préambule à l'élaboration d'un principe de modélisation architecturale

Les trois premières sous-parties ont permis de poser les principes théoriques relatifs à la démarche qui sera explicitée en quatrième partie. Il reste à synthétiser les analyses entreprises, et à énoncer des choix qui y correspondent, puis de mettre en place un « cahier des charges » résultant de notre problématique, et des éléments abordés dans les parties précédentes.

3.4.1. Types de modélisation

Nous avons remarqué en §3.2.1 que la destination du modèle influe sur son état. De même, le choix du mode d'élaboration influence le résultat.

3.4.1.1. Modélisation impérative

La modélisation impérative figure un objet dont on a une idée précise, elle est une technologie mature et éprouvée, et permet de modéliser la quasi-totalité des objets du réel, la limite ne venant pas de la technologie, mais de la complexité de certains objets. Les principaux logiciels de modélisation sont fondés sur des principes impératifs : ils permettent de réaliser des modèles très complexes grâce à une multitude d'outils performants [GAI05].



Figure 36 : modélisation impérative

Ces logiciels proposent plusieurs méthodes de génération de la géométrie. La modélisation par combinaison de plusieurs d'entre elles permet l'obtention d'un grand nombre de géométries possibles. La modélisation impérative impose l'expertise à l'utilisateur, tant les outils sont nombreux et perfectionnés. Le résultat dépend ainsi directement des connaissances de la personne qui modélise [HEG03]. Pour une personne non initiée, le travail le plus difficile ne réside pas dans l'acte

même de modélisation, mais dans l'apprentissage de l'outil de construction de la géométrie. Il convient de se représenter au préalable tout le processus de transformation des primitives (Polygones, Nurbs etc.) avant d'arriver au modèle final. Pendant la phase de création des primitives, le modèle en cours est composé des éléments terminés et en cours de construction. Il n'est complet qu'à la fin du processus.

3.4.1.2. Modélisation déclarative

La modélisation déclarative permet de créer un objet géométrique sans connaissance de modélisation préalable. La description des caractéristiques de l'objet désiré le façonne par étapes successives de choix de solutions. Les propriétés de l'objet sont considérées comme des contraintes pour le modeleur de solutions, la génération de solutions passe donc par la résolution du système de contraintes. Les modeleurs déclaratifs doivent par conséquent permettre la gestion de descriptions sous-contraintes ou sur-contraintes.

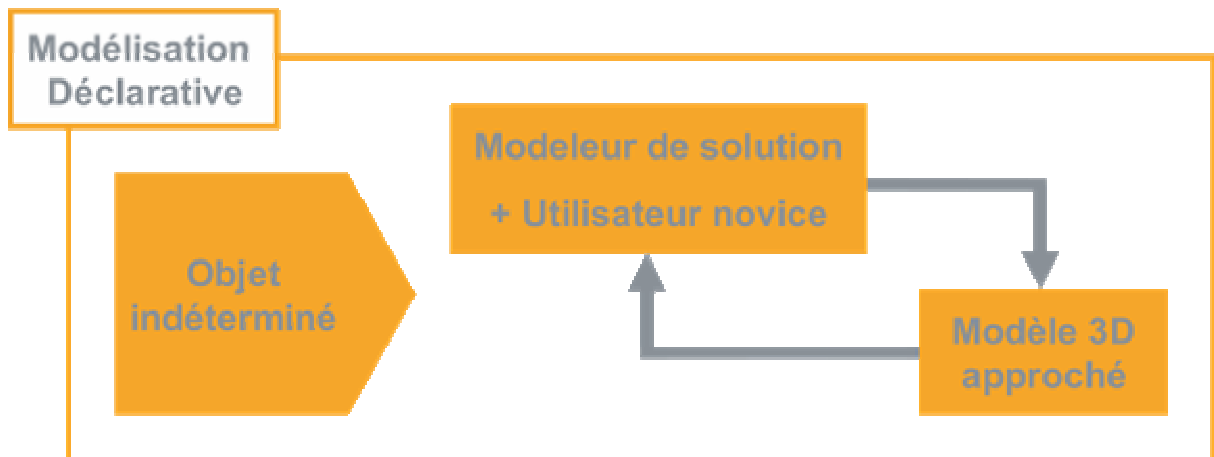


Figure 37 : modélisation déclarative

Le modèle converge ainsi vers une solution s'approchant de plus en plus de celle décrite. Tout au long des itérations, le modèle est cohérent par rapport aux propriétés formulées. La modélisation déclarative est une discipline de recherche plus qu'une solution de modélisation, elle est fondée sur la façon dont on génère les solutions en conception d'objets (en architecture et en design par exemple). Le processus voisine l'approche classique de conception et permet à l'utilisateur de préciser et d'enrichir son idée de départ au fur et à mesure de l'avancement. [GAI05]

3.4.1.3. Modélisation fonctionnelle

La modélisation fonctionnelle correspond à la construction d'un modèle tridimensionnel par la description de la géométrie dans un langage fonctionnel. Les objets géométriques créés résultent de fonctions affectées de paramètres variés. La construction de la géométrie se fait en une seule exécution de toute la description du modèle. La modélisation fonctionnelle est intéressante, car elle permet l'intégration du savoir faire lié à l'objet modélisé dans la description de la géométrie. La modélisation de processus mène à la définition des objets à modéliser comme des fonctions [TID96]. Le principe de modélisation revient à créer des fonctions pour chaque élément identifiable de l'objet, dans le but de générer le modèle visé en spécifiant les paramètres désirés.

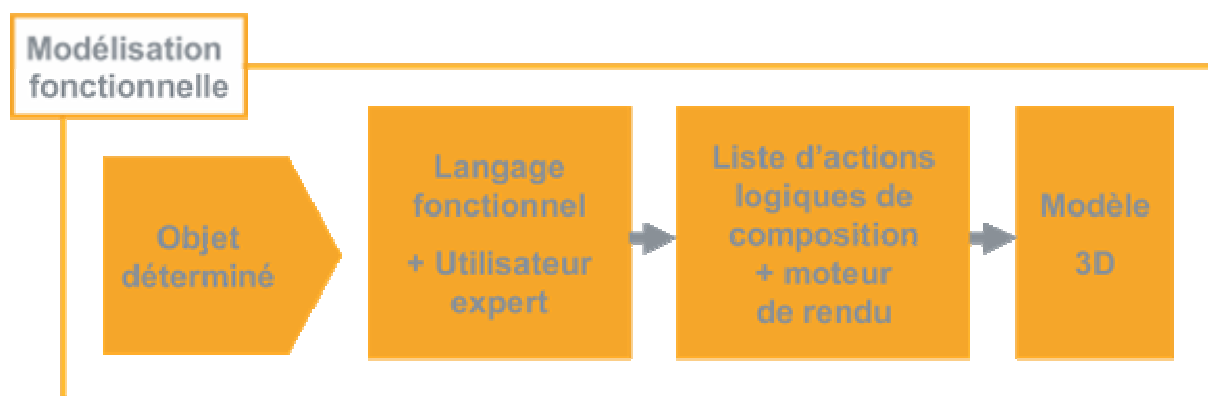


Figure 38 : modélisation fonctionnelle

3.4.1.4. Positionnements pour un processus de modélisation géométrique

Ces trois procédés de construction de modèles géométriques s'avèrent relativement différents. Des besoins et des attentes spécifiques vis-à-vis de ces moyens de modélisations géométriques existent, qui conduisent à la nécessité de se positionner par rapport à la question de la figuration du processus de combinaison de la documentation écrite et dimensionnelle. Nous avons vu que la géométrie est un moyen très pertinent et omniprésent pour représenter un ouvrage bâti, qui ne correspond pas au modèle complet, mais uniquement à sa partie visible. Le modèle architectural correspond à l'aboutissement de la modélisation en tant que processus, dont il importe de définir clairement le moyen de gestion, en commençant par le choix du type de modélisation géométrique. Certaines caractéristiques de chacune des trois méthodes que nous venons de parcourir nous intéressent. Le principe de

modélisation déclarative prend en compte la notion de modélisation par étapes et permet de gérer l'augmentation de la précision progressive du modèle. De plus, son postulat qui considère les faibles capacités à modéliser de l'utilisateur s'intègre dans notre problématique de pluridisciplinarité. La modélisation fonctionnelle rend possible la formulation explicite du savoir-faire, et permet de créer des objets géométriques qui en découlent. En outre, une fonction ainsi créée est indépendante de l'objet, et donc réutilisable pour la création d'autres objets. L'enregistrement des procédures de création plutôt que de l'état de l'objet laisse entrevoir de puissants moyens de gérer l'historique de modélisation. Enfin, la modélisation impérative offre le plus d'outils de génération de la géométrie, de par sa maturité et sa prédominance dans le marché des logiciels de modélisation géométrique. Ces trois type de modeleurs ont chacun leurs qualités, il nous faut choisir l'un d'eux pour y effectuer notre étude.

Ce travail ne consiste pas à créer une interface de modélisation. La solution d'utiliser un modeleur existant reste la plus pertinente, d'autant plus que les interfaces impératives se caractérisent par la grande liberté laissée à l'utilisateur⁶¹. Le choix du type de modélisation peut se formuler ainsi : les interfaces de modélisation impérative permettent d'appliquer les principes définis comme importants et proposés par les autres types de modélisation. Il ne reste plus qu'à choisir le logiciel ; ce que nous verrons en dernière partie.

3.4.2. Caractéristiques du modèle

Nous avons constaté dans les paragraphes 3.2.3 et 3.2.4 l'importance de deux caractéristiques imbriquées d'un modèle géométrique. Pour obtenir un modèle cohérent, l'analogie utilisée (ici forme / géométrie) doit être réciproque ; par conséquent, les objets géométriques représentant les objets réels doivent être constitués de façons équivalentes. La proportion entre dimension et relation interne à la géométrie se doit de représenter l'objet réel. La géométrie doit découler de la combinaison des documentations. Il s'agit de percevoir l'imbrication des notions de dimension et de relation comme un moyen préliminaire de combinaison.

3.4.2.1. Modèle relationnel

Un modèle géométrique d'ouvrage bâti constitué de façon entièrement relationnelle se montre complet et cohérent. Les objets géométriques représentant les éléments

⁶¹ Un même résultat peut être obtenu de plusieurs façons, chacun des trois grands logiciels (MAYA, 3DSMAX et AutoCAD) ont une interface de développement.

architecturaux s'organisent selon les relations existantes d'adjacence, de symétrie ou de proportion par exemple. Les dimensions sont directement issues des relations entre les objets géométriques. Le modèle peut de cette manière être défini jusqu'au niveau de détail désiré. La modélisation relationnelle peut être considérée comme la définition de la géométrie. En effet, le positionnement relatif des objets entre eux constitue le point de départ de la création du modèle géométrique. La construction d'un tel modèle permet de s'affranchir des techniques d'acquisition et des défauts qui empêchent la complétude d'un modèle, qui cependant ne se révèle pas aux bonnes dimensions.

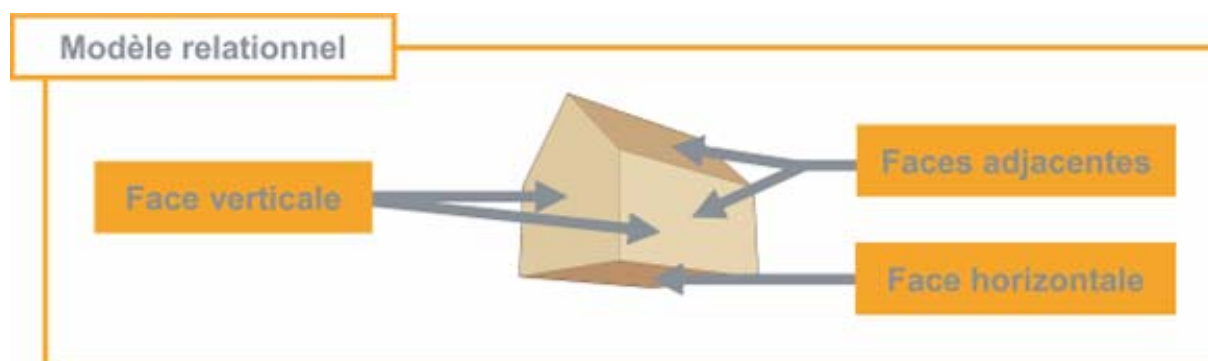


Figure 39 : modèle géométrique relationnel

3.4.2.2. Modèle dimensionnel

L'aspect dimensionnel représente la valeur de position absolue des objets, ou de mise à l'échelle⁶². On peut décrire par exemple la façon dont le point est mesuré par un scanner laser : à chaque unité de référence d'angle, on mesure la distance à l'objet ; le rayon laser percute la façade et revient : on enregistre la position du bâtiment à cet endroit. Le point est mesuré en fonction des paramètres de densité du nuage de point, et non en fonction de l'objet relevé. L'acquisition ne prend pas non plus en compte la complexité de l'objet, l'opérateur définit un polygone de capture avec un pas donné ; la fréquence des tirs n'évolue pas en fonction de la complexité. Un plan est considéré de la même manière qu'une moulure, alors que la définition de leur forme ne nécessite pas le même nombre de points.

⁶² Sans rattachement à un référentiel précis.

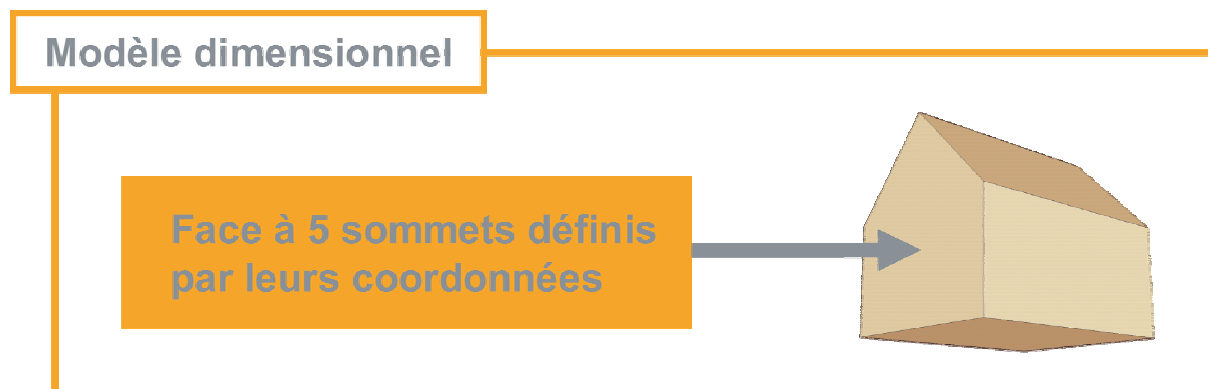


Figure 40 : modèle géométrique dimensionnel

3.4.2.3. Positionnement par rapport à la nature de la géométrie

La prise en compte des deux caractéristiques de la géométrie - relation entre ses composantes et dimensionnement – permet de consigner un grand nombre d'informations relatives à l'ouvrage ; si cet enregistrement est effectué méthodiquement, la représentation tridimensionnelle peut être complète. La géométrie produite exclusivement à partir d'acquisition de données produits des modèles partiels. Compléter de tels modèles revient davantage à une réparation liée à la volonté d'une apparence du modèle, plutôt qu'à un processus rationnel. On peut parvenir à créer un modèle géométrique complet en le définissant de façon relationnelle. Une des contraintes de la recherche est donc de trouver un moyen de définir la géométrie de façon cohérente et d'y affecter une contrainte dimensionnelle. La géométrie définie de façon relationnelle au préalable peut alors être perçue comme un cahier des charges à la mesure : chaque objet géométrique est défini, avant d'être dimensionné.

3.4.3. Gestion de la complexité et de la complication

La complexité et la complication dont il est question ici correspondent à celles qui subsistent après l'analyse de l'objet à modéliser. Celles-ci devront être gérées et devenir une partie intégrante du modèle final.

3.4.3.1. Phénomène réduit : complexité circonscrite

La complexité liée à la modélisation d'un ouvrage bâti peut être répartie en plusieurs catégories. La première, la complexité d'ordre général provient directement de la nature de l'objet à relever : l'ouvrage architectural. C'est un ensemble cohérent qui répond à un nombre élevé de contraintes programmatiques, constructives,

structurelles et esthétiques. La seconde correspond à la complexité liée à un élément particulier tel qu'une colonne ou une corniche. La dernière réside dans la coexistence d'éléments complexes. Mise à part la complexité liée à un élément, les deux autres découlent d'une interaction entre plusieurs concepts⁶³.

3.4.3.2. Processus par étapes

Un modèle qui vise à représenter un phénomène complexe ne se construit pas en une seule opération. Le processus à mettre en place doit permettre la prise en compte de la complexité au fur et à mesure de la construction du modèle. Il est à remarquer que toutes les étapes ne peuvent pas diviser rigoureusement le problème de la complexité, ce qui induit le fait que certaines seront plus simples que d'autres. Il faut profiter de cette caractéristique pour y intégrer des éléments liés à la complexité d'ordre général citée dans le paragraphe précédent.

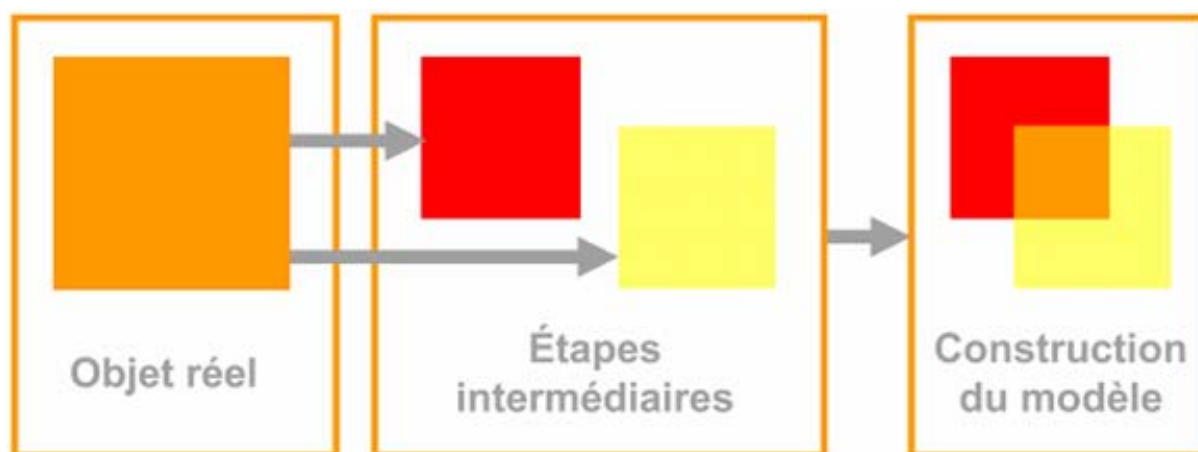


Figure 41 processus par étapes

3.4.4. Gestion de la documentation

Nous avons énoncé les contraintes qui nous mènent aux choix que nous expliciterons dans la quatrième partie. Il nous faut aussi évoquer le moyen de gérer les informations qui ne sont pas prises en compte par l'outil de modélisation géométrique.

3.4.4.1. Utilisation des différents types de documents

Le paragraphe §2.1.4 nous a permis d'aborder la notion d'encapsulation de l'information dans différents types de documentation (géométrique, écrite,

⁶³ Dans notre exemple : la complexité générale liée à l'imbrication de contraintes et l'autre à la relation entre certains éléments.

photographique). Les documents doivent être analysés et les informations résultantes doivent être filtrées, enregistrées et mises en relation avant de pouvoir être intégrées dans le processus de modélisation ; analyse et filtrage traitent de la pertinence et de la traductibilité de l'information recueillie. Certaines d'entre elles ne sont pas traductibles autrement que par la création de la géométrie elle-même ; d'autres, comme les données dimensionnelles, sont enregistrables et utilisables informatiquement. Les informations ne sont donc pas traitées de la même manière selon leur aspect conceptuel. Certaines sont enregistrées directement, d'autres doivent être transformés et intégrées dans la géométrie pour être « utiles ». La convergence de ces informations se fait de façon informatique, ce qui implique la création d'une base de données.

3.4.4.2. Base de données

La base de données est un outil polyvalent qui permet d'intégrer un grand nombre de type d'objets. Les gestionnaires de base de données offrent de multiples fonctions de recherche, de mise en relation par le biais de requêtes⁶⁴ sur la base [COM03]. Dans notre cas, la base contiendra les informations relatives à la modélisation et le modèle sous la forme d'informations géométriques. Le fait que le modèle soit stocké dans la base de données renforce la qualité de représentation du modèle géométrique.

3.4.4.3. Relation base / géométrie

La base de données s'avère le moyen de centraliser toutes les informations relatives au processus de modélisation de l'ouvrage architectural. On a vu au paragraphe §4.4.1 que les informations sont soit directement enregistrées dans la base de données, soit intégrées à la géométrie pour pouvoir être exploitables. La géométrie étant enregistrée dans la base de données, les informations traduites directement en objets géométriques sont ainsi implicitement contenues dans la base. La géométrie est la partie visible de la base de données. Si l'on veut accéder à des informations contenues dans la base mais non visibles sur la géométrie, il faut donc prendre en compte des moyens de requête par le biais d'interaction avec la géométrie.

3.5. Conclusion sur la modélisation d'ouvrage architectural :

⁶⁴ Les requêtes dans une base de données sont faites généralement en SQL qui est le langage normalisé le plus répandu en ce qui concerne les bases de données.

Dans cette troisième partie, nous avons insisté sur les différences entre documentation dimensionnelle et documentation écrite. Nous avons identifié les types de documentation écrite relatives aux ouvrages architecturaux. Nous avons aussi décrit l'encapsulation des connaissances architecturales dans l'aspect extérieur même de l'ouvrage, ainsi que dans les différents types de documents. Après avoir resitué ce qui est couramment entendu comme la modélisation tridimensionnelle par rapport à la modélisation scientifique, nous avons énoncé l'affinité de notre recherche avec la modélisation dans son acception scientifique. Ceci s'explique par la combinaison de différents types de documents. Cette prise en compte générale de la documentation impose la référence constante du modèle à son processus d'élaboration. Pour mettre en place un processus de modélisation d'un ouvrage bâti, il est nécessaire de prendre en compte la façon dont on peut intégrer complication et complexité qui constituent le monument. Les trois principaux moyens de construire un modèle géométrique offrent chacun des solutions intéressantes. Les interfaces de modélisation impérative, de par leur polyvalence, donnent la possibilité d'appliquer une vision fonctionnelle et progressive à la construction du modèle. C'est pourquoi notre choix de type d'outil tend vers ce mode de gestion de la géométrie : il permet un compromis entre les différents principes. Nous avons terminé cette partie par la question relative aux moyens d'enregistrement des informations complémentaires à la géométrie : la base de données.

4. Quatrième partie : proposition d'outils et méthodes de modélisation d'objets architecturaux

Notre démarche prenant en compte la combinaison de différentes techniques d'acquisition, il nous faut considérer le plus grand nombre d'informations permettant la documentation de l'objet. L'intégration de renseignements complémentaires à la mesure aboutit à notre proposition d'une méthode de modélisation d'un ouvrage bâti à base d'acquisitions tridimensionnelles de différentes natures. Pour obtenir une documentation cohérente d'un ouvrage architectural, nous devons procéder à des hypothèses basées sur des informations non fournies par les données 3D issues des mesures. Ces informations sont issues des connaissances architecturales relatives à la conception de l'ouvrage à modéliser.

4.	Quatrième partie : proposition d'outils et méthodes de modélisation d'objets architecturaux _____	145
4.1.	Analogie entre conception architecturale et relevé d'ouvrage _____	149
4.1.1.	Ouvrage bâti comme résultat de la conception architecturale _____	149
4.1.1.1.	Complexité progressive _____	149
4.1.1.2.	Conception par étape _____	149
4.1.1.2.1.	Implantation et forme générale _____	150
4.1.1.2.2.	Composition de l'ouvrage _____	150
4.1.1.2.3.	Mise en place des éléments fonctionnels _____	151
4.1.1.2.4.	Relations des éléments entre eux _____	151
4.1.1.2.5.	Détails _____	151
4.1.1.3.	Intégration des connaissances architecturales _____	152
4.1.2.	Le relevé comme processus _____	152
4.1.2.1.	Décomposition du problème _____	152
4.1.2.2.	Gestion de la modélisation architecturale par niveau de détail _____	153
4.1.2.3.	Phénomène complexe et multitude de données _____	153
4.1.2.4.	Découpage/segmentation des données _____	154
4.1.3.	Définition et dimensionnement du modèle _____	154
4.1.3.1.	Les connaissances architecturales comme guide explicite à la modélisation _____	155
4.1.3.1.1.	Analyse de l'ouvrage _____	155
4.1.3.1.2.	Vérification des hypothèses _____	155
4.1.3.1.3.	Du construit vers le modèle _____	156
4.1.3.2.	Combinaison des techniques d'acquisition _____	157
4.1.3.2.1.	Convergence des formes de données _____	157
4.1.3.2.2.	Choix des données _____	158
4.1.3.2.3.	Le modèle comme cahier des charges _____	160
4.1.4.	Du général au détail _____	161
4.1.4.1.	Forme de base _____	162
4.1.4.1.1.	Nomenclature des façades _____	162
4.1.4.1.2.	Positionnement et échelle _____	163
4.1.4.2.	Divisions du volume _____	163
4.1.4.2.1.	Divisions verticales _____	164
4.1.4.2.2.	Divisions horizontales _____	164
4.1.4.2.3.	Dimensionnement _____	164
4.1.4.3.	Insertions _____	165
4.1.4.3.1.	Ouvertures _____	165
4.1.4.3.2.	Dispositifs monumentaux _____	165
4.1.4.3.3.	Positionnement _____	166
4.1.4.4.	Mise en relations _____	166
4.1.4.4.1.	Discontinuité _____	166
4.1.4.4.2.	Transition et préparation _____	166
4.1.4.5.	Détails _____	167
4.1.4.5.1.	Détails décomposables géométriquement _____	168
4.1.4.5.2.	Objets importés _____	168
4.1.5.	Expérimentation de la méthode analogique _____	169
4.1.5.1.	Simulation _____	169
4.1.5.2.	Conclusion _____	169
4.2.	Traduction numérique des connaissances architecturales _____	170

4.2.1.	Caractère abstrait de la connaissance	170
4.2.1.1.	L'architecte comme porteur de connaissances liées aux bâtiments	170
4.2.1.2.	Caractère implicite de la formalisation de connaissances	171
4.2.2.	Différentes représentations	172
4.2.2.1.	Sémantique architecturale	172
4.2.2.1.1.	Dictionnaire général du bâtiment : Dicobat	174
4.2.2.1.2.	Principes d'analyse scientifique, architecture, vocabulaire	174
4.2.2.1.3.	Synthèse sur la sémantique	175
4.2.2.2.	Représentations traditionnelles 2D	176
4.2.2.3.	Représentations tridimensionnelles	178
4.2.2.3.1.	Maquettes	178
4.2.2.3.2.	Numérique	179
4.3.	Outils d'aide à la modélisation d'ouvrage bâti	181
4.3.1.	Trois concepts essentiels	181
4.3.1.1.	une démarche	181
4.3.1.2.	Une méthode	182
4.3.1.3.	Un principe	182
4.3.2.	Deux publics visés	183
4.3.2.1.	Architectes	183
4.3.2.2.	Topographes	183
4.3.3.	La base de données comme lieu de regroupement des connaissances	183
4.3.3.1.	Informations sémantiques	184
4.3.3.2.	Relations hiérarchiques	185
4.3.3.3.	Outils géométriques particuliers	185
4.3.3.4.	Regroupement des données dimensionnelles	186
4.3.3.5.	Instrument de synthèse	186
4.3.4.	Mise en place d'un outil de gestion du relevé architectural	186
4.3.4.1.	Logiciel d'accueil	186
4.3.4.1.1.	Manipulation de la géométrie	187
4.3.4.1.2.	Programmation	187
4.3.4.1.3.	Gestion de formats standard	187
4.3.4.2.	Type d'entités géométriques	188
4.3.4.3.	Gestion du modèle architectural	189
4.3.4.3.1.	Faces	189
4.3.4.3.2.	Lieux géométriques	189
4.3.4.3.3.	Données tridimensionnelles	190
4.3.4.3.4.	Le plan comme intermédiaire :	191
4.3.4.4.	Dimensionnement des faces	192
4.3.4.4.1.	Plan de référence	192
4.3.4.4.2.	Association plan / Face	192
4.3.4.4.3.	Validation pragmatique	192
4.3.5.	Définition puis dimensionnement : expérimentation	192
4.3.5.1.	Niveau de détail spécifique :	193
4.3.5.2.	Application des deux premières étapes du processus	194
4.3.5.3.	correspondance entre modèle et jeu de données	194
4.3.5.3.1.	Jeu de données :	195
4.3.5.3.2.	Deux types de mise en contrainte dimensionnelle :	196
4.3.5.4.	Le modèle comme aide à la segmentation	197
4.3.5.5.	Conclusion sur le dimensionnement	197
4.3.6.	Aspect fonctionnel	198

4.3.6.1.	Enregistrement d'action _____	199
4.3.6.2.	Répétitions _____	199
4.3.6.3.	Expérimentations préliminaires _____	200
4.3.6.3.1.	Essais en deux dimensions _____	200
4.3.6.3.2.	Le dessin comme enregistrement _____	200
4.3.6.3.3.	Bibliothèque d'entités fonctionnelles _____	201
4.3.6.4.	Conclusion sur l'apport de l'aspect fonctionnel _____	202
4.4.	Outils spécifiques aux étapes _____	203
4.4.1.	Forme de base _____	203
4.4.1.1.	Nomenclature des façades _____	203
4.4.1.2.	Positionnement et échelle _____	203
4.4.2.	Divisions du volume _____	204
4.4.2.1.	Divisions verticales et horizontales _____	205
4.4.2.2.	Considérations hiérarchiques et redondance _____	205
4.4.2.3.	Décrochements _____	206
4.4.2.4.	Dimensionnement _____	206
4.4.3.	Insertions _____	207
4.4.3.1.	Baies _____	207
4.4.3.2.	Dispositifs monumentaux _____	209
4.4.3.3.	Positionnement _____	209
4.4.4.	Mise en relations _____	209
4.4.4.1.	Transition et préparation _____	210
4.4.5.	Détail _____	210
4.4.5.1.	Chapiteau corinthien _____	211
4.4.5.2.	Entablement composite _____	212
4.4.5.3.	Colonnets khmères _____	213
4.5.	Conclusion sur la proposition de modélisation d'ouvrage _____	215

4.1. Analogie entre conception architecturale et relevé d'ouvrage

Le relevé architectural procède d'une analogie implicite entre ouvrage bâti et modèle tridimensionnel. Celle-ci est basée sur l'état fini de l'ouvrage, d'une part, et du modèle, d'autre part.

4.1.1. Ouvrage bâti comme résultat de la conception architecturale

La conception architecturale est une démarche de formalisation d'un programme donné en un projet puis en un ouvrage construit. C'est un processus progressif basé sur la durée.

4.1.1.1. Complexité progressive

Un ouvrage construit est d'une grande complexité car il est le résultat de très nombreuses contraintes telles que le programme, les réglementations, le fonctionnement, les obligations techniques et économiques, etc., que l'architecte doit intégrer dans son projet d'ouvrage. Les éléments de programme qui ont été définis au départ ont été combinés aux contraintes législatives, techniques et constructives pour obtenir un ensemble cohérent. Cet état fini, résultat d'une solution d'arrangement de ces éléments, est significatif d'un long processus de complexification du concept, de l'idée initiale. L'architecte débute souvent son projet avec un principe qu'il va formaliser et enrichir de façon continue jusqu'à la finalisation de l'ouvrage bâti. Chaque contrainte est combinée au projet qui prend corps au fil du processus et la complexité de l'ouvrage en projet croit au fur et à mesure de la conception.

4.1.1.2. Conception par étape

Avant de parvenir à l'ouvrage terminé, la conception de celui-ci est passée par plusieurs étapes [DUR03]. Les étapes décrites ci-dessous ne visent pas à expliquer comment l'architecte conçoit. Leur rôle est de montrer comment les éléments constitutifs de l'ouvrage final se mettent en place au fur et à mesure de la conception architecturale. Dans la perspective d'une formalisation de l'ouvrage, notre analyse nous mène à découper ce processus en cinq étapes majeures [BON93]. Celles-ci ne se veulent pas cohérentes vis-à-vis du temps passé mais en rapport à la complexité

progressive de l'ouvrage. En effet, le principe d'analogie est un outil de recherche que nous utilisons pour trouver des moyens de gérer la complexité. Notre hypothèse de comparaison entre la conception et la modélisation est une piste que l'on doit adapter au mieux, mais qui présente des distorsions entre certaines étapes au regard notamment du temps passé à concevoir.

4.1.1.2.1. Implantation et forme générale

Le programme qui a été énoncé pour la constitution de l'ouvrage, impose une superficie totale de planchers à construire. De plus, le terrain sur lequel le bâtiment va être construit possède des caractéristiques liées à son environnement, à sa forme, à la région dans laquelle il se trouve par exemple. Un terrain en forte pente impose des implantations particulières liées au ruissellement des eaux. Le contexte juridique impose également des contraintes : le règlement lié au terrain et à la construction impose par exemple une hauteur maximale de construction ainsi qu'une surface autorisée de construction en relation avec la contenance du terrain (COS). Mais l'architecte doit aussi considérer les bâtiments alentours préexistants afin de ne pas altérer l'ensemble du site sur lequel il intervient. Toutes ces contraintes liées au programme et au terrain imposent une forme générale à l'ouvrage. Elles constituent une « enveloppe » dans laquelle il va falloir que l'ouvrage s'intègre.

4.1.1.2.2. Composition de l'ouvrage

Une fois le principe d'implantation déterminé, l'architecte procède à la mise en place de la composition générale du bâtiment. La forme globale définie doit être divisée en niveaux ainsi qu'en groupes d'espace. L'objectif est de rassembler les parties du programme qui ont des affinités et de disposer harmonieusement tous les espaces nécessaires. De plus, il faut positionner les principaux corps de bâtiments, les accès principaux tels que les entrées et les circulations verticales et horizontales. La forme de l'ouvrage évolue : d'abord grossière, elle s'affine au fur et à mesure de l'intégration des exigences du programme, d'une part, et des nécessités de nombreuses fonctionnalités, d'autre part.

4.1.1.2.3. Mise en place des éléments fonctionnels

Le bâtiment prend forme ; les espaces qui vont le constituer sont distribués et mis en relation entre eux par des circulations horizontales et verticales. Chaque espace a une destination spécifique, une fonction. Il faut le qualifier et rendre possible l'activité qu'il doit supporter. Il va devoir présenter des dimensions appropriées, des dispositifs spécifiques comme par exemple, recevoir de la lumière naturelle. L'espace est considéré pour lui-même dans un premier temps, c'est-à-dire pour ses propres contraintes fonctionnelles sans considérer ses interactions avec d'autres espaces adjacents.

4.1.1.2.4. Relations des éléments entre eux

Les espaces qui constituent l'ouvrage ont chacun reçu les dispositifs qui les rendent fonctionnels. D'un point de vue général, l'ouvrage est composé de l'arrangement de ces espaces qui doivent être harmonisés entre eux pour s'intégrer le mieux possible à l'ouvrage. Certains éléments constitutifs des espaces se manifestent au niveau de l'aspect formel du bâtiment. L'harmonisation de l'ouvrage vient de l'organisation des interactions des espaces entre eux et avec l'ouvrage lui-même ; des espaces d'une même surface facilite des percées régulières dans les façades, si l'on veut respecter une trame en façade, elle se ressent à l'intérieur. Il est à remarquer que ces interactions se passent entre trois types d'entités : l'ouvrage, les espaces et leurs composants.

4.1.1.2.5. Détails

La dernière étape, au cours de la conception architecturale, se situe au niveau de la concrétisation du projet. Il faut envisager la façon dont chaque élément structurant prendra forme concrètement. Les éléments doivent être fabriqués et assemblés entre eux. Le choix des matériaux et des principes constructifs influent sur la réalisation de l'ouvrage. La conception de détails, tels qu'un garde-corps ou une rambarde d'escalier, représente la dernière phase précédant la réalisation de celui-ci.

Durant la conception de l'ouvrage, ces étapes ne sont pas aussi tranchées qu'il n'y paraît dans notre exposé volontairement très schématique : des allers-retours s'opèrent en permanence entre chacune d'elles, la chronologie est variable suivant

les concepteurs, l'importance accordée aux phases et aux éléments également. La description qui vient d'être faite permet de montrer l'évolution progressive de la complexité constitutive de l'ouvrage parallèlement à l'intégration des contraintes liées au bâtiment.

4.1.1.3. Intégration des connaissances architecturales

La conception architecturale peut être définie comme la résolution d'un problème constitué de contraintes de différentes natures où la solution retenue n'est qu'une parmi une infinité de possibles. Sa résolution passe par l'application de méthodes de conception souvent propres à chaque concepteur. Chaque étape décrite précédemment, qui peut être source de problème, est soumise aux savoirs de l'architecte, capable grâce à ses connaissances de surmonter les obstacles de l'édification. La conception architecturale est un processus essentiellement empirique: c'est avant tout la pratique qui permet d'acquérir les connaissances indispensables à la conception.

4.1.2. Le relevé comme processus

Tout comme le processus de conception de l'ouvrage, le relevé d'un bâtiment est une action qui se déroule sur une période conséquente. La prise en compte du relevé nous permet de mettre en lumière l'analogie qui existe entre la conception de l'ouvrage et le processus de relevé. Les états résultant de ces deux actions sont le bâtiment d'une part, et le modèle d'autre part. L'utilisation de cette similitude permet de se réapproprier les caractéristiques de la conception architecturale et de les traduire pour faciliter le relevé. L'intérêt vient essentiellement du fait que la conception aboutit à l'objet complexe qu'est le bâtiment. Comme il est possible d'introduire la complexité de façon méthodique au cours du processus de conception, c'est-à-dire par phases identifiées, il devient intéressant d'identifier et d'adapter les étapes qui ont permis cela pour le relevé.

4.1.2.1. Décomposition du problème

L'approche de la construction du modèle tridimensionnel d'un ouvrage architectural par étapes induit une décomposition du problème posé. La complexité n'est pas réduite au détail qui l'occasionne mais elle se considère à l'échelle du modèle global,

on peut s'attacher à la gérer progressivement : l'architecte se doit de jouer sur le multiscalaire. Chaque étape permet de centrer la construction du modèle sur quelques points. La décomposition du processus en étapes successives s'oppose à une division spatiale du problème, on ne traite pas les zones, les unes après les autres dans leur complexité complète. Elle permet de prendre en compte les étapes précédentes et de procéder par enrichissement, alors qu'une division spatiale nécessite une fusion des résultats, qui est elle-même porteuse de complexité.

4.1.2.2. Gestion de la modélisation architecturale par niveau de détail

La cohérence du niveau de détail d'une représentation d'ouvrage a été précédemment évoquée⁶⁵. La modélisation graduelle permet d'obtenir à la fin de chaque étape une représentation complète et cohérente de l'objet architectural. Le cas le plus défavorable de représentation relative à la cohérence du modèle se situe au milieu d'une phase, où s'opère la transition entre le niveau précédent et celui en cours. La différence maximale de niveau de détail à ce moment est de une étape. En effet, certains éléments qui viennent d'être créés peuvent se juxtaposer à d'autres provenant de l'étape précédente. Ce principe de modélisation permet ainsi de réduire la différence globale de niveau de détail à un niveau au maximum. A la fin de chaque étape, le modèle en cours est homogène par rapport au niveau de détail considéré.

Un autre avantage de la modélisation progressive est que l'on a toujours une géométrie complète. La géométrie initiale se complexifiant au fur et à mesure du processus, on préférera des modifications ou ajouts à l'association d'éléments géométriques, qui elle, est créatrice de trous ou de manques. Ce principe permet ainsi une complétude du modèle en permanence.

4.1.2.3. Phénomène complexe et multitude de données

La complexité qui concerne le relevé de l'ouvrage dans le cas de cette étude vient en partie de l'ouvrage à relever⁶⁶ mais aussi de la combinaison des différents moyens de documentation de l'ouvrage. L'objet de l'étude est complexe de par sa nature. Cependant, l'usage en parallèle de différents moyens pour en réaliser le

⁶⁵ cf. § 3.3.2.1

⁶⁶ Cf. troisième partie

modèle ajoute une grande part de difficulté au processus de modélisation. La réunion de données produites grâce à la photogrammétrie et le balayage laser induit une grande quantité d'informations qu'il faut analyser et organiser.

4.1.2.4. Découpage/segmentation des données

La division de la modélisation d'un ouvrage bâti grâce à l'analogie avec le processus de conception architecturale permet également de gérer le découpage des données provenant de la documentation dimensionnelle. La modélisation progressive permet la définition d'éléments architecturaux de plus en plus précisément. Il est possible d'associer à cette définition d'entités le découpage en parallèle de la masse des données relatives à l'ouvrage. Chaque étape de l'élaboration du modèle devient, de ce fait, l'occasion d'une segmentation partielle des données dimensionnelles. L'apport progressif du sens par la succession des phases de modélisation est directement réutilisé pour la segmentation. De plus, en procédant de cette façon, la segmentation peut ne pas se faire en une seule étape ce qui permet de faciliter la gestion des grandes quantités de données.

4.1.3. Définition et dimensionnement du modèle

Le souci principal de notre approche réside dans la façon de construire le modèle géométrique, l'objectif étant qu'il soit le plus complet, le plus homogène possible, et le mieux dimensionné. Le constat de manque dans un modèle, produit à partir d'une seule technique d'acquisition, induit la combinaison, qui permet le mélange des types de données (points, vecteurs ou encore images). La combinaison des types de documentation accentue cette hétérogénéité. De cette multitude de moyens naît une complexité supplémentaire qui est en majorité due à la prise en compte simultanée des procédés de complémentation de la géométrie. Notre proposition d'approche de la modélisation par étapes se joue à plusieurs échelles. Cinq étapes significatives de la mise en forme d'un ouvrage durant le processus de conception architecturale ont été énoncées précédemment (au § 1.1.2). Une adaptation de ces phases sera proposée pour la modélisation d'un ouvrage bâti. Mais auparavant il est nécessaire de décrire le principe d'évolution de la géométrie au sein de ces étapes. L'hypothèse selon laquelle les éléments de géométrie doivent être définis avant d'être qualifiés

dimensionnellement a été émise⁶⁷ précédemment. La mise en relation préalable, qui peut être réalisée en utilisant les connaissances architecturales et le dimensionnement, est accomplie grâce aux données recueillies.

4.1.3.1. Les connaissances architecturales comme guide explicite à la modélisation

Les relations géométriques doivent correspondre à la réalité de l'ouvrage, d'autant plus que l'on procède par niveau de détail croissant. Si l'ouvrage s'offre à la vue dans ses moindres ornements, la décomposition du bâtiment doit être d'autant plus précise et pertinente qu'on est loin du niveau de détail réel. Pour ce faire, on utilise, dans un premier temps, l'analyse puis la documentation architecturale qui permet de formaliser les connaissances liées aux ouvrages.

4.1.3.1.1. Analyse de l'ouvrage

En ce qui concerne l'analyse d'un ouvrage, rien ne peut remplacer l'approche pragmatique, surtout lorsque l'on se trouve dans une phase préliminaire à un processus de modélisation. En effet l'expérimentation in situ est toujours plus parlante que d'après documents. En fonction de l'importance du monument, on dispose ou non de documentation analytique liée à l'ouvrage⁶⁸. L'analyse peut être effectuée pour constituer la base documentaire ou pour la compléter. Elle peut être réalisée sur place ou à partir d'images prises de l'ouvrage. Cette analyse doit être accomplie pour chaque niveau de détail lié aux étapes décrites subséquentement. Elle est basée sur l'observation et sur la compréhension de l'ouvrage. Lorsqu'un principe de composition est considéré, on émet l'hypothèse qu'il doit être intégré au modèle pour représenter l'ouvrage à un niveau de détail précis. C'est l'ensemble des hypothèses de composition de l'ouvrage qui va permettre de définir les relations qui composent le modèle géométrique pour une étape donnée.

4.1.3.1.2. Vérification des hypothèses

Les hypothèses faites à partir de l'analyse de l'ouvrage ont une influence d'autant plus grande sur la constitution du modèle, que le processus est progressif : chaque étape dépend de la précédente. Ces principes de composition doivent donc être

⁶⁷ Cf. § 3.4.2.3

⁶⁸ Cf. §3.1.3.2

vérifiés avant d'être appliqués pour la mise en relation. Pour saisir les règles utilisées par l'architecte, la documentation antérieure est la plus appropriée. L'aspect doctrinaire que peuvent avoir ces ouvrages renforce l'énonciation des principes à utiliser pour la composition de bâtiment, mais il est rare d'y avoir accès même lorsqu'ils existent encore. L'usage de la documentation générale devient, dans ce cas, nécessaire en cas de défaut de documentation antérieure⁶⁹. Les ouvrages généraux couvrent un domaine de connaissances architecturales très vaste. Les informations que l'on y trouve doivent être considérées avec précaution. En effet, pour permettre la validation des hypothèses de composition grâce aux informations provenant des ouvrages généraux, on doit d'abord resituer le contexte du bâtiment en rapport avec les descriptions trouvées, à l'aide de documents structurés, tel un dictionnaire. Les documents thématiques, quant à eux, sont composés et organisés de telle sorte que le contexte est plus clair. Si l'ouvrage que l'on souhaite modéliser s'inscrit dans un mouvement stylistique majeur, classique ou renaissance, les principes de sa composition seront aisément recouvrables. La tentative de définition du modèle à l'aide des connaissances architecturales ne doit pas se transformer en démarche archéologique, si la documentation écrite relative à l'ouvrage architectural vient à manquer, les hypothèses de constructions ne doivent pas être plus nombreuses que les preuves.

4.1.3.1.3. Du construit vers le modèle

A chaque étape, le processus d'analyse se répète, il s'agit à chaque fois de déterminer quelles caractéristiques influenceront sur le niveau de détail en cours. Une fois que ces éléments sont identifiés, il faut les appliquer au modèle, faire en sorte que le transfert entre le fait observé et la forme géométrique représentative soit le plus juste. La mise en place d'une organisation codifiée du relevé et sa filiation avec le processus de formation de l'ouvrage permettent de guider chaque étape. Elles ont un rôle précis et, de ce fait, orientent l'analyse, d'une part, et l'enrichissement de la géométrie, d'autre part. C'est pourquoi l'objectif de chaque étape doit être simple, logique et clairement spécifié. La précision dans la définition des étapes influe sur la portée d'un tel processus. Il faut encadrer la traduction du réel vers le modèle mais de manière concomitante, éviter de cloisonner notre proposition dans un style

⁶⁹ Cf. §3.1.3.1 et § 3.1.3.3

architectural particulier. L'utilisation de la formalisation du bâtiment, dans son acception élargie, comme référence pour notre proposition de modélisation apporte, par son large éventail de combinaisons possibles, l'éventualité de viser plus d'une seule morphologie d'ouvrage. L'action de formalisation des principes de composition analysés depuis l'ouvrage vers une définition de la géométrie est plus du ressort de la conception de l'interface, qui prend en charge la modélisation, que de son utilisateur. Les possibilités et performances liées à cette traduction dépendent ainsi principalement des outils qui seront proposés, de leur complémentarité et performance vis-à-vis du processus complet.

4.1.3.2. Combinaison des techniques d'acquisition

Pendant le déroulement d'une étape de modélisation, la définition de la géométrie se fait ainsi sans notion de dimensionnement autre que relativement aux objets entre eux : les éléments peuvent servir de repères de mesure. Les connaissances architecturales guident l'utilisateur dans son analyse de l'ouvrage et lui permettent de valider les hypothèses qu'il a émises. L'interface, qui sera décrite ultérieurement, doit lui permettre de traduire la synthèse des caractéristiques qu'il a relevées. Il faut maintenant aborder l'intégration des données dimensionnelles au sein de chaque étape.

4.1.3.2.1. Convergence des formes de données

Avant d'envisager la façon d'intégrer l'information dimensionnelle, il nous faut rappeler l'hypothèse précédemment émise⁷⁰. La concurrence entre les techniques majeures d'acquisition à distance, à savoir la photogrammétrie et le scanner optique, et la possibilité de leur combinaison, entraîne une convergence dans l'organisation des données. Les données produites sont déjà de type vectoriel⁷¹ et la production de nuages de points aussi bien par corrélation automatique en photogrammétrie qu'à partir de scanner optique tend à se généraliser. Ainsi, le type de données pris en compte dans ce travail est le nuage de point. Ce choix n'est pas fait par restriction mais pour simplifier la gestion des données dans notre processus. Sachant que les deux techniques produisent des nuages de points, seules leurs caractéristiques

⁷⁰ Cf. fin de la deuxième partie

⁷¹ Données vectorielles : point, lignes, polyligne, faces.

(précision, densité, choix ou non du point par exemple) permettent de les différencier et de faire un choix de technique en fonction d'un besoin spécifique.

4.1.3.2.2. Choix des données

Le dimensionnement de la géométrie doit être réalisé en fonction de critères, qui permettent de choisir entre les différentes techniques d'acquisition et la précision des mesures. Ils dépendent de l'étape de modélisation en cours, c'est-à-dire du niveau de détail, dont la définition se base sur la représentation traditionnelle sur papier⁷². Les étapes de formalisation de l'ouvrage au cours de la conception architecturale sont figurées (plans, coupes, élévations) et nécessitent ainsi le choix d'une échelle de représentation appropriée. Nous utilisons ce lien entre étape de modélisation, niveau de détail correspondant et échelle de représentation équivalente afin de définir le besoin en précision. Le tableau 1 ci-dessous donne la correspondance entre les étapes, l'échelle de représentation et la précision appropriée. La valeur de précision acceptable est à prendre comme ordre de grandeur. En effet, elle dépend de l'ouvrage considéré. La différence de dimensions, qui est sous-entendue dans l'acceptation de bâtiment, en est la cause.

Etape	Représentation équivalente	Précision acceptable (en centimètres)
1	1/500ème	50
2	1/200ème	20
3	1/100ème	10
4	1/50ème	5
5	1/10ème	0.5

Tableau 1 : relation entre étape de modélisation et précision des données

Le besoin en précision est relatif à l'élément que l'on dimensionne et non pas directement au point mesuré. Cette relation entre l'exigence et la capacité à produire

⁷² Cf. § 3.2.1.3

une donnée correcte nous conduit souvent à utiliser des données plus précises que ce qui est nécessaire. La première raison vient, naturellement, du fait que l'on ne produit pas des données spécifiques pour chaque niveau de détail mais que l'on vise la précision requise par le niveau de détail final du modèle. La définition d'une précision nécessaire n'est donc pas l'application d'une contrainte d'usage mais une recommandation. L'usage d'éléments plus précis que nécessaire impose un traitement préalable pour mettre à niveau le jeu de données, car la quantité et la densité ne sont pas en rapport avec les besoins. On peut, si cela est nécessaire, procéder à un échantillonnage des données⁷³.

Les deux techniques d'acquisition considérées, à savoir la photogrammétrie et le balayage optique, peuvent être divisées en deux types, selon qu'il soit terrestre ou aérien. La qualité et la valeur des données peuvent être classées de la manière suivante :

Etapas	Photogrammétrie		Balayage optique	
	Aérienne (restitution)	Terrestre	Aérien	Terrestre
1				
2				
3				
4				
5				

Tableau 2 : utilisation adaptée (vert), en limite de précision (orange), inadaptée (rouge)

Le tableau 2 est une synthèse des possibilités et des limites d'usage des deux techniques d'acquisition (en mesures aériennes et terrestres).

Une des principales différences entre la photogrammétrie et le balayage optique réside dans le choix du point à mesurer. En revanche, cette caractéristique provoque l'estimation du point choisi s'il n'est pas clairement reconnaissable⁷⁴. Cette particularité est déterminante lors de l'usage des données Lidar aériennes qui

⁷³ A l'aide de logiciels de traitement de nuages de points tel que RealWorks (Mensi-Trimble)

⁷⁴ cf. §2.1.5.4

permettent d'obtenir quelques points par mètre carré de terrain. Il est possible de les utiliser pour la première étape mais pas pour la seconde, même si la précision des points mesurés le permettait. Etant donné la faible densité, il est difficile d'obtenir des points correctement placés, alors qu'en photogrammétrie, le choix des points rend tout à fait approprié son usage pour la deuxième étape. Cette comparaison est uniquement basée sur des critères de précision et de densité. Il faut souligner que la mesure aérienne, du fait de sa configuration, ne peut pas prendre en compte les plans verticaux. S'il est possible d'envisager l'utilisation des données aériennes pour la première étape et seulement celles issues de la photogrammétrie pour la seconde, on ne peut guère recueillir plus d'informations, même si la précision le permettait.

Du fait de sa polyvalence et du choix des points, la photogrammétrie terrestre est utilisable depuis la première étape jusqu'à la cinquième, car sa précision n'est pas centimétrique. Toutefois, le laser terrestre doit être considéré plus en détail. Son usage n'est pas approprié pour la première phase. En effet, soit la surabondance des données complexifie l'isolement de quelques points ; soit le manque de mobilité du dispositif d'acquisition empêche l'enregistrement de toute l'étendue de l'ouvrage.

Chaque étape ayant une exigence de précision croissante, au fur et à mesure de l'évolution du modèle, on a le choix entre différentes techniques pour certains niveaux, mais plus la précision augmente, moins ce choix est possible. La combinaison est envisageable, en considérant les adaptations respectives de chacune des techniques.

4.1.3.2.3. Le modèle comme cahier des charges

Après avoir considéré de quelle manière la division par phase du processus de modélisation permet de clarifier certains points quant à l'utilisation particulière de chaque technique d'acquisition, il nous faut envisager le modèle géométrique relationnel comme guide à l'acquisition de données. En effet, nous avons vu que le modèle, défini au préalable de façon relationnelle, est complet. Or, on utilise des techniques d'acquisition, qui, même combinées, ne permettent pas toujours d'obtenir un modèle complet. On peut en conclure que certains éléments définis de façon relationnelle ne le seront jamais de façon dimensionnelle. Il faut, dès lors, considérer l'élément qui n'a pas pu être dimensionné comme un guide à l'acquisition : ainsi, un

retour sur le site peut s'avérer nécessaire en vue de mesures complémentaires. Notre proposition ne cherche pas à mesurer le non mesurable, mais à améliorer la lisibilité entre ce qui a été dimensionné et ce qui ne peut pas l'être avec le jeu de données en l'état.

4.1.4. Du général au détail

Ouvrage pour expérimentation



Figure 42 : ouvrage utilisé pour l'expérimentation : le musée zoologique de Strasbourg

L'analogie entre la conception architecturale et la modélisation d'ouvrage bâti doit, dès lors, être formalisée. Après avoir synthétisé le processus de conception et l'avoir décrit en cinq étapes significatives par rapport à la formalisation de l'ouvrage, il est nécessaire d'en effectuer la traduction et l'adaptation à la problématique de modélisation de l'extérieur du bâtiment. Il faut distinguer les deux processus : la conception est réflexive alors que la modélisation est descriptive. Les étapes

considérées, du point de vue de la conception, correspondent au résultat de réflexions, de mise en place, de calage et de positionnement.

La représentation, qui en découle, concorde avec le principe de figuration [TID96] ; alors que, du point de vue, de la modélisation d'ouvrage, nous sommes confrontés à de la description structurée et où nous visons la rationalisation du relevé. Nous utilisons ici, pour l'expérimentation de ces étapes de modélisation, un ouvrage de la fin du XIX^{ème} siècle : le musée zoologique de Strasbourg (Figure 42). C'est un ouvrage massif, construit pendant la période de l'occupation allemande de Strasbourg, qui fait partie de l'université mise en place par l'élan constructeur de Guillaume II. Beaucoup d'ouvrages de ce type ont été construits à cette époque.

4.1.4.1. Forme de base

Cette étape est à mettre en relation avec la première phase qui a été décrite⁷⁵ et intitulée : implantation et forme générale. Lors de la conception, il s'agit de mettre en place un premier raisonnement concernant l'intervention dans son ensemble. Pour la modélisation, elle permet la mise en place de divisions de base liées à l'ouvrage entier.

4.1.4.1.1. Nomenclature des façades

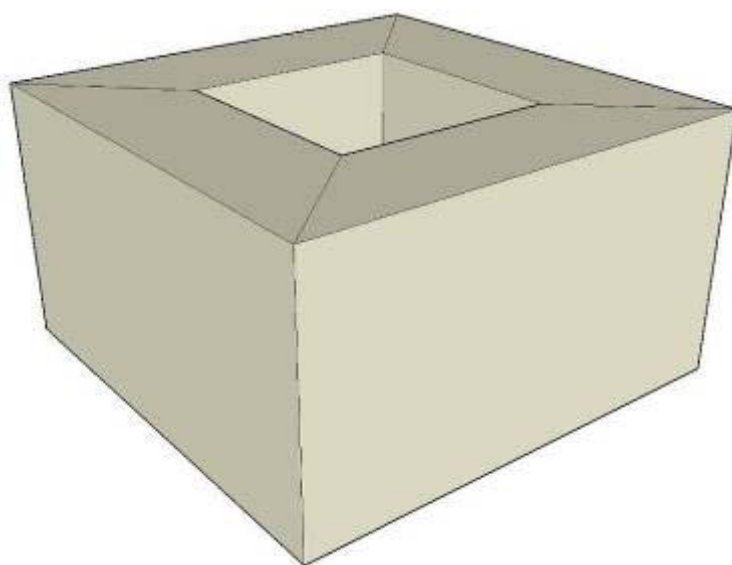


Figure 43 : une face correspond à une façade principale

La première étape doit mettre en place un objet géométrique dont chaque élément représente une façade du bâtiment. Par façade, il faut entendre ici, ce terme dans son acception la plus large, en considérant également les toitures. On associe ainsi à chaque façade un nom significatif permettant de s'y rapporter par la suite. La tradition veut que les noms des

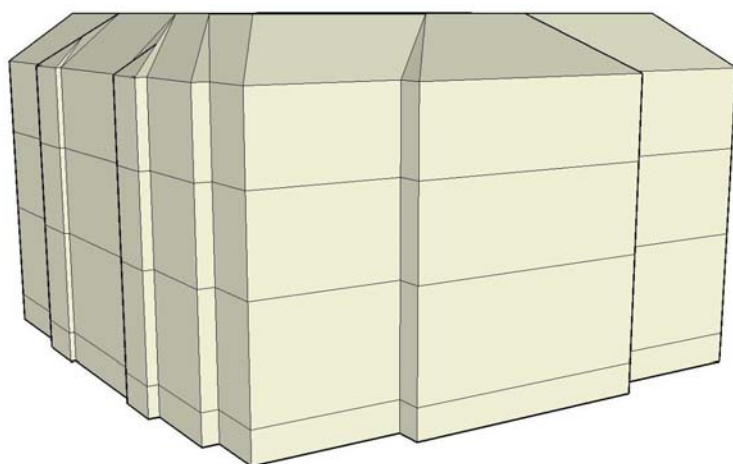
⁷⁵ Cf. §4.1.1.2.1

façades se réfèrent à l'orientation de celle-ci et portent, par conséquent le nom des points cardinaux. Il est possible de les dénommer en faisant référence au contexte urbain : le nom de la rue par exemple. Ce principe s'accorde avec des ensembles d'ouvrages, lorsque plusieurs bâtiments réunis ont des façades de même orientation (Le Louvre : façade Rivoli par exemple). L'attribution d'un nom de façade à chaque élément du modèle est une contrainte pour son élaboration, et devient, ainsi, un critère d'évaluation de la pertinence de la géométrie à la fin de l'étape. Il est à noter que cette première étape considère un bâtiment dans sa forme la plus simple possible et peut être rapprochée d'une forme topologique. La figure 43 montre que notre exemple à cette étape a la forme d'un tore.

4.1.4.1.2. Positionnement et échelle

Dans le cadre de cette étape, il est possible, déjà, d'utiliser des données dimensionnelles. L'intégration des données relatives au modèle correspond aux points qui vont permettre de définir la forme générale et l'orientation de chaque façade. De cette manière, il est possible de mettre le modèle à l'échelle, et de le positionner en relation avec son contexte spatial. Le niveau de détail obtenu à la fin de cette étape correspond à l'échelle du 1/500^{ème}, échelle équivalente au plan d'implantation. La forme globale, la position relative et l'échelle sont des critères de définition au niveau urbain. L'utilisation d'un tel modèle peut être envisagée pour une maquette du quartier d'une ville [PER04].

4.1.4.2. Divisions du volume



La traduction de la deuxième étape différencie clairement les deux processus concernés. Si, dans la première étape, les similarités permettaient encore une confusion, les orientations, de la modélisation descriptive d'une part, et celles relatives à l'extérieur, d'autre part, par

Figure 44 : mise en place de la volumétrie

rapport à la conception, caractérisent clairement le modèle obtenu. De plus, l'ouvrage modélisé est, dès lors, clairement identifiable et reconnaissable à partir du modèle. Les principes de composition générale du bâtiment peuvent être exprimés par la mise en place des divisions des façades, qui peuvent être scindées en deux types : à savoir verticales ou horizontales.

4.1.4.2.1. Divisions verticales

La division d'une façade selon la direction verticale, peut être le fruit de plusieurs facteurs. Le dessin de la façade peut se faire selon des critères esthétiques, qui imposent la mise en avant du corps central de l'ouvrage, par exemple. La composition classique procède souvent de cette façon. La forme du bâtiment peut aussi être le résultat de l'agencement intérieur : dans ce cas, la répartition des espaces se manifeste par des avancées découpant la façade.

4.1.4.2.2. Divisions horizontales

Les divisions horizontales peuvent, certes, provenir des mêmes causes que celles précédemment citées. Mais dans la majorité des cas, ce sont les niveaux qui provoquent ces découpages. En effet, la division du bâtiment en niveaux se traduit en façade de façon explicite (Figure 44). Il faut noter que la division horizontale se différencie de la verticale par sa propagation à l'échelle de l'ouvrage. Les bâtiments ont souvent des niveaux étendus sur leur totalité contrairement aux avancées, plus localisées.

4.1.4.2.3. Dimensionnement

La géométrie évolue à chaque étape, les façades sont divisées. Il est possible de qualifier des morcellements par des données segmentées à cet effet. Les divisions horizontales sont plus difficiles à dimensionner que les décrochements car un nombre limité d'éléments les qualifie en façade. Pour les bâtiments classiques, choisis comme exemple de cette étude, les nez de plancher sont souvent repérables par des frises⁷⁶. Ces éléments ont peu de reliefs pour la plupart. La qualification des niveaux en façade dépend ici de la précision des données utilisées.

⁷⁶ Cf. figure 1

4.1.4.3. Insertions

Un type d'élément définissant la deuxième étape de conception, qui n'a pas été utilisé en deuxième phase de modélisation et qui peut, de façon plus pertinente, être intégré dans l'étape nommée « insertions », a été intitulé « dispositifs d'accès ». Les accès principaux se manifestent, certes, souvent par des décrochements en façade, mais la conséquence de l'accès est l'ouverture créée dans le mur. Dans cette étape, il s'agit de mettre en place les « discontinuités » de façade, tels que les ouvertures et les dispositifs monumentaux (colonnes).

4.1.4.3.1. Ouvertures

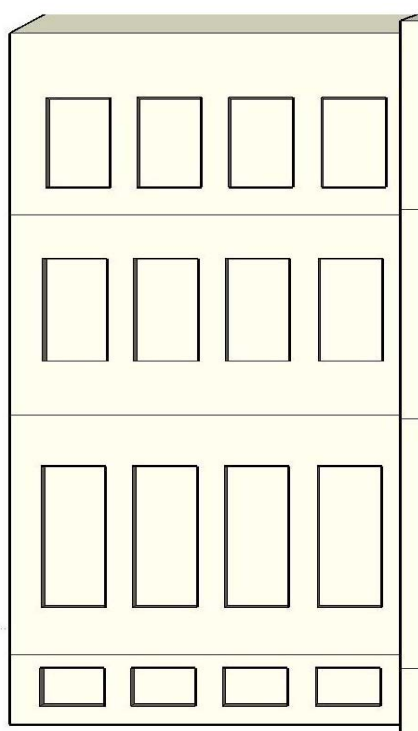


Figure 45 : insertion des ouvertures

Les ouvertures se manifestent essentiellement par des portes et ou des fenêtres ; peuvent s'ajouter à ces deux principaux éléments, les ouvertures de toitures pour ne citer qu'eux. En façade, les fenêtres sont généralement beaucoup plus nombreuses que les portes et souvent répétées. Les baies sont la liaison entre l'extérieur et l'intérieur. Dans le cas de la modélisation de l'extérieur de l'ouvrage, elles constituent une limite, dont la définition sera analysée ultérieurement⁷⁷.

4.1.4.3.2. Dispositifs monumentaux

On distingue, en tant que dispositifs monumentaux, les éléments ornementaux qui se manifestent à l'échelle de l'ouvrage. Ces éléments, tels que les colonnes, ont une fonction esthétique majeure pour l'ouvrage. Ils participent, à part entière, à la définition géométrique de l'ouvrage, mais, dans la mesure où ils influent sur la forme

⁷⁷ Cf. §4.4.3.1

générale, il est nécessaire de les intégrer suffisamment tôt dans le processus de modélisation.

4.1.4.3.3. Positionnement

L'intégration des données issues de l'acquisition tridimensionnelle est, certes, utile pour les dimensions des baies, d'une part, mais surtout pour la définition de leurs répétitions, d'autre part. En effet, les fenêtres étant souvent répétées, la distance de répétition est recouvrable dans la masse des données.

4.1.4.4. Mise en relations

Les événements de façade sont insérés dans le mur de celle-ci. L'insertion de ces éléments ne se fait pas en un endroit précis : elle crée une zone de transition aussi bien ornementale que structurelle. Le linteau permet le report des charges sur les piédroits, par exemple. Ces zones de transition entre les événements et la partie courante de la façade doivent être localisées pour être qualifiées par la suite.

4.1.4.4.1. Discontinuité

La discontinuité représente l'absence de transition. C'est parce qu'il y a parfois ce genre d'«événement» que cette étape est importante. L'exemple d'un angle entre deux façades permet de se rendre compte du phénomène. Deux façades sont reliées entre elles par un chaînage d'angle. Quand il est en pierre, il se manifeste souvent par un traitement en table⁷⁸, par exemple. La possibilité qu'une transition n'existe pas, peut minimiser l'importance de cette étape, mais elle est indispensable pour les transitions manifestées.

4.1.4.4.2. Transition et préparation

La transition a été définie ci-dessus par son contraire,. Il faut ajouter, à cette première approche, que la déclaration des transitions introduit une partie des éléments de détail qui vont suivre : le traitement des transitions est de l'ordre du détail. Toutefois, le détail peut être un ornement sans fonction sous-jacente, mais qu'il faut situer.

⁷⁸ En avancée par rapport au plan de la façade.

Cette phase préparatoire de transition est nécessaire pour la gestion des détails. Elle ne requiert, toutefois, pas de dimensionnement : les éléments de mise en relations seront soumis aux dimensions des détails qui y seront traités.

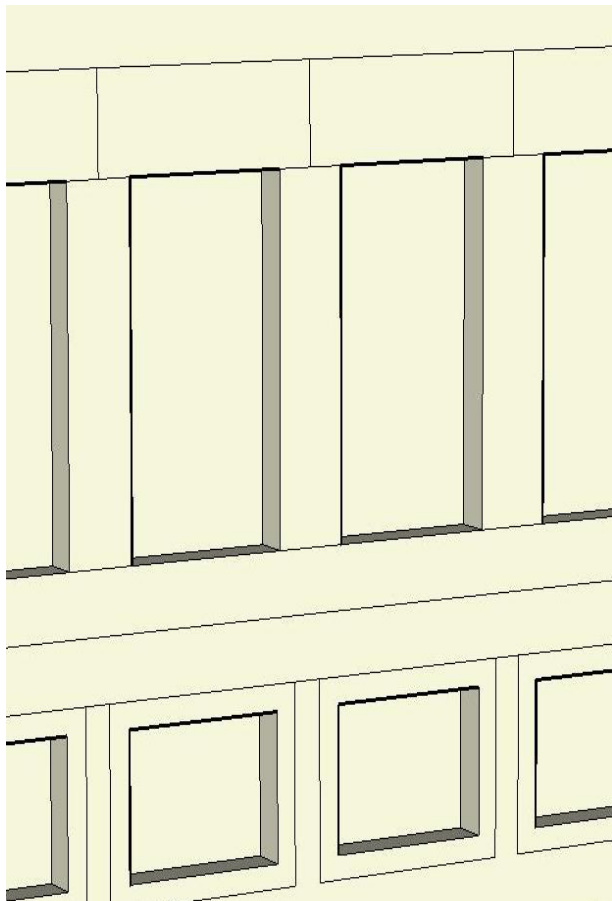


Figure 46 : définition des transitions

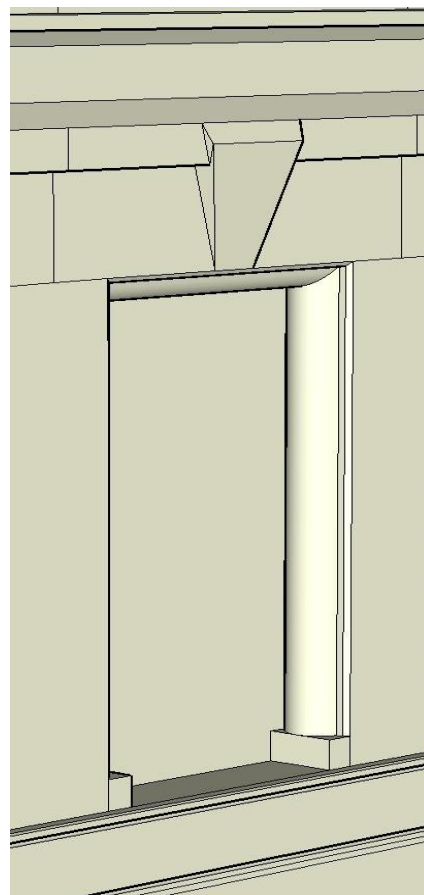


Figure 47 : mise en place des détails

4.1.4.5. Détails

Comme cela a été évoqué au paragraphe précédent, quelques détails (ornement de piédroit par exemple) constituent le traitement ornemental de certaines liaisons. Cependant, on en trouve aussi qui ont une fonction uniquement esthétique. Cette différenciation se manifeste par la position du détail sur le mur, à savoir s'il est isolé ou pas. Les détails se différencient également par la possibilité de les modéliser : soit ils sont géométriquement décomposables, soit leur forme est « sculpturale » telle qu'une représentation d'animaux dans un bas relief.

4.1.4.5.1. Détails décomposables géométriquement

Les éléments de détail, qui se soumettent à la décomposition, peuvent être modélisés, dans la majeure partie des cas, par la modélisation par balayage : un profil correspondant à la silhouette de l'objet est défini et on lui fait parcourir le chemin nécessaire [BEG03], qui peut ou non être un profil [KAD04]⁷⁹.

4.1.4.5.2. Objets importés

La complexité de certains ornements, tels que les statues ou les ornements végétaux, ne permet pas la décomposition. Les objets importés peuvent être de différentes sortes.

Maillage : La technique du maillage, à partir de nuages de points, permet des rendus satisfaisants pour ce genre d'éléments. Une solution consiste en la possibilité de les importer en tant qu'objets directement dans le modèle. C'est ici que la phase de préparation prend son sens. Elle permet de préparer la portion de mur qui doit recevoir l'élément externe au modèle [LUC06].

Objets paramétrés : L'architecture classique a hérité des principes antiques de composition. Cette remise au goût de l'époque a été théorisée de façon telle que de nombreux éléments, peuvent être générés sur la base d'un élément paramétrable [BRA97].

Détails composites : Il ne faut pas exclure la possibilité de combinaison entre des éléments décomposables et d'autres qui ne le sont pas, dans un même détail⁸⁰.

La notion de détail est difficile à appréhender. On peut les subdiviser encore en plusieurs niveaux de définition possible relatifs à la possibilité de les décomposer. La modélisation de chaque type de détail peut constituer un sujet d'étude en soit. L'objectif de notre étude n'étant pas de prendre en compte tous les détails, nous rendons simplement possible l'intégration de géométries quelconques en guise de détails⁸¹.

⁷⁹ Cf. §4.4.5.2

⁸⁰ Cf. §4.4.5.2

⁸¹ Cf. §4.4.5

4.1.5. Expérimentation de la méthode analogique

La mise en place des principes de modélisation se fait de façon exploratoire. Le choix de l'ouvrage qui permet ce travail doit être judicieux : non seulement représentatif d'un grand nombre de bâtiments, mais encore simple pour permettre l'analyse complémentaire et la répartition des étapes. Dans cette perspective, Le musée zoologique de Strasbourg se prête bien à l'expérimentation du processus de modélisation par étapes.

4.1.5.1. Simulation

Les figures 43 à 47 montrent les étapes finies et abouties de modélisation effectuée dans le logiciel Sketchup. La nécessité de simuler cette modélisation progressive a pour fonction de vérifier si tous les éléments sont modélisables dans ce processus. Les colonnes engagées de l'avancée de l'entrée (Figure 42) n'ont, par exemple, pas été modélisées pour cette simulation, car elles sont du même ordre que les baies à l'étape d'insertion. Le but de cette expérimentation est de tester la validité du découpage en étapes ainsi que de référencer les outils majeurs de modélisation pour chaque étape, qui sont à intégrer dans l'interface proposée.

4.1.5.2. Conclusion

La modélisation d'un ouvrage classique simple est réalisable en utilisant le principe de modélisation par étapes que nous proposons. Cette dernière permet de se fixer des objectifs intermédiaires qui rendent possible la compréhension et la lisibilité de l'ouvrage considéré. La complexité de celui-ci est restituée au fur et à mesure de la modélisation. L'approche méthodique de la division en étape autorise donc une vision rationnelle de la modélisation d'un édifice.

4.2. Traduction numérique des connaissances architecturales

Notre recherche se base sur la mise à disposition des connaissances architecturales durant la phase de modélisation d'ouvrages bâtis. Les techniques d'acquisition utilisées pendant le relevé architectural produisent des données numériques. Il faut donc transférer ces connaissances vers les outils numériques de modélisation, à savoir les fonctions de mise en forme de la géométrie et de saisie de la sémantique.

4.2.1. Caractère abstrait de la connaissance

Les connaissances considérées de façon générale ont un caractère abstrait. Leur transmission correspond à leur formalisation.

4.2.1.1. L'architecte comme porteur de connaissances liées aux bâtiments

Le bâtiment, dont l'architecte en tant que concepteur est le principal intervenant, est l'aboutissement du projet architectural. Ce dernier, qui est le fruit d'un travail de composition, d'ordonnancement, de spatialisation d'un programme, se complète au fil du temps par l'intégration et la combinaison des connaissances, constructive, structurelle et esthétique. L'architecte accumule et gère donc toutes les connaissances qui permettent l'érection du bâtiment. Pour décrire sa composition il utilise des moyens de figuration très variés, tels que plans, croquis perspectifs, maquettes. Pendant la phase d'apprentissage de ces outils de communication, une connexion directe mais implicite, permettant au projet d'évoluer de façon efficace, se crée entre la pensée, les concepts et les moyens de représentation. C'est par l'apprentissage du projet que l'étudiant en architecture prend possession de tous ces outils de figuration. Cette formalisation s'insère dans le processus de conception de l'œuvre par de nombreux allers et retours entre le dessin et l'autocritique génératrice d'autres idées, d'autres dessins. Ainsi, la production architecturale prend naissance par l'automatisme que génère la répétition de ces allers-retours. La formalisation des idées permet le choix entre différents partis architecturaux et fait avancer le projet. Dans cette perspective, la représentation, qui ne permet pas la communication des connaissances qui l'ont générée, est une démarche de synthèse, donc de simplification. Les connaissances architecturales ne sont donc pas explicitées dans le travail de représentation architecturale. Celle-ci nécessite un travail d'induction de

la part de gens ne maîtrisant pas ce domaine pour parvenir à saisir le processus de création et les moyens mis en œuvre et choisis pour représenter l'édifice pour en recueillir la connaissance qui a été utilisée pour sa création.

4.2.1.2. Caractère implicite de la formalisation de connaissances

La transmission des connaissances s'opère par la contextualisation du savoir [GUI02]. Le caractère abstrait des connaissances doit être illustré, c'est pourquoi la transmission du savoir architectural est liée, de manière intrinsèque, à la pratique de conception. Pendant l'enseignement du projet architectural à l'école d'architecture, une grande partie du savoir architectural se transmet. L'étudiant, dont les connaissances se construisent par la mise en pratique, outil essentiel de la transmission du savoir, élabore des projets, encadré par des enseignants architectes. Dans ce cadre, le projet d'architecture est perçu comme phase d'apprentissage. Ainsi, les méthodes de gestion de la conception se mettent en place par l'encadrement du projet.

L'importance de la pratique de la conception architecturale dans la maîtrise des connaissances est un obstacle pour notre recherche. C'est pourquoi nous proposons dans ce travail, une analogie entre le processus de conception et la modélisation. Ce principe est énoncé comme une méthode, un guide pour la modélisation d'ouvrage. Les connaissances qui ne peuvent pas être saisies sans l'aide de leurs détenteurs doivent être explicitées. La proposition d'un outil d'aide à la modélisation d'ouvrage bâti doit ainsi prendre en compte la non transmissibilité de certaines connaissances telles quelles. De la même manière, il est nécessaire que cette proposition en rende accessible suffisamment pour rendre possible leur intégration dans le modèle. Les représentations de l'architecture, tout comme l'ouvrage construit, renferment en elles un savoir architectural plus ou moins accessible à ceux qui n'en possèdent pas les codes de lecture : la représentation est faite pour l'architecte ou pour d'autres initiés (les constructeurs par exemple). C'est une organisation spécifique, un arrangement particulier du savoir destiné à communiquer le projet, une cristallisation de l'ouvrage à un moment donné, pour une phase d'esquisse par exemple. Dans les documents relatifs aux ouvrages architecturaux, les connaissances y sont consignées,

organisées. La nécessité d'usage de la documentation écrite a déjà été mentionnée⁸² pour ce qui concerne l'analyse de l'ouvrage : cette documentation sera utilisée par celui qui effectuera le relevé et la modélisation du bâtiment. Comme nous l'avons vu, il en reste une partie qui n'est exploitable qu'en partie par les architectes. Néanmoins, ces connaissances doivent être utilisées, dans le but de permettre leur intégration dans modèle de l'ouvrage. Nous tenterons d'employer ce savoir dans le développement de notre outil de modélisation.

4.2.2. Différentes représentations

Tous les moyens de formalisation des connaissances architecturales ne transmettent pas les mêmes choses. Leur utilisation combinée permet d'intégrer le plus de savoir possible pendant le processus de modélisation. On peut distinguer trois modes de transcription des connaissances : la sémantique, les représentations bi et tridimensionnelles.

4.2.2.1. Sémantique architecturale

Chaque élément qui compose un ouvrage architectural a un nom⁸³. Le bâtiment peut être entièrement décrit pas des mots relatifs aux objets qui le constituent. La sémantique peut participer, de ce fait, à une démarche de communication de l'architecture et, ainsi, être une représentation de l'ouvrage à part entière. De part sa compréhensibilité, si l'on omet la spécialisation du vocabulaire, l'utilisation de la sémantique dans la description de l'architecture procède d'une démarche de vulgarisation. Cette accessibilité de la sémantique la positionne comme élément majeur de transmission des connaissances. Il faut souligner ici que l'on considère la sémantique comme vecteur de connaissances. Il a été dit précédemment que la connaissance était difficilement accessible, elle le reste au travers de la sémantique même si elle constitue le vecteur le plus aisé à mettre en œuvre.

⁸² Cf. § 4.1.3.1

⁸³ Cf.
Figure 48

Architecture et sémantique

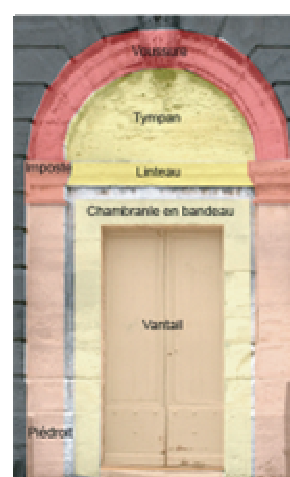
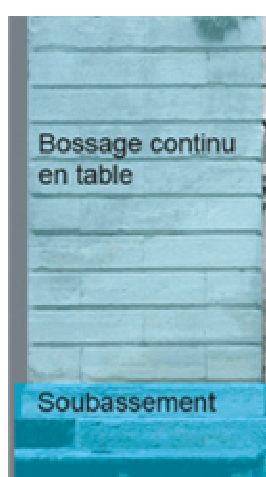


Figure 48 : description sémantique de l'architecture à deux niveaux de détail différents: exemple d'un mur de soubassement de la promenade du Peyrou à Montpellier.

4.2.2.1.1. Dictionnaire général du bâtiment : Dicobat

Le Dicobat⁸⁴, déjà présenté comme élément de documentation générale⁸⁵, est un exemple d'utilisation de la sémantique comme moyen de description de l'architecture. De par sa structure de dictionnaire, son utilisation est suffisamment aisée. Il est enrichi par de nombreuses illustrations qui permettent de faire le lien entre la forme de l'objet, sa fonction et son nom.

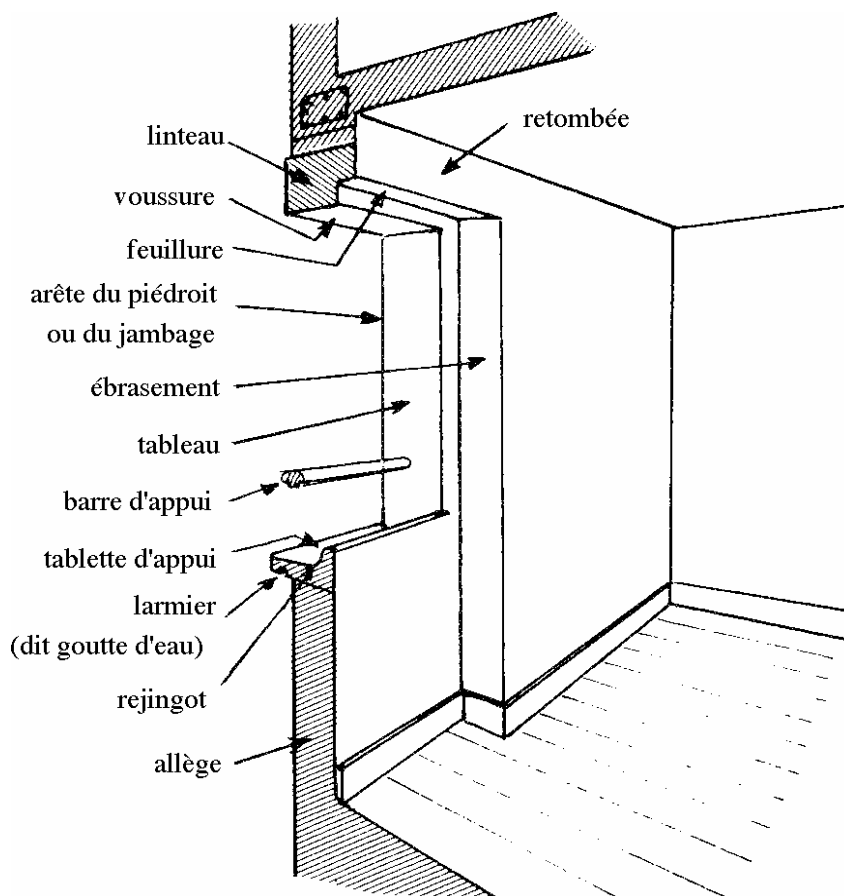


Figure 49 : la baie et ses encadrements, illustration du Dicobat [VIG92]

4.2.2.1.2. Principes d'analyse scientifique, architecture, vocabulaire

Alors que le Dicobat aborde l'architecture dans un sens plus global, l'ouvrage de Jean-Marie Peyrouse de Montclot⁸⁶ est dédié à l'analyse de monument. Cet ouvrage est organisé en fonction des niveaux de détail des monuments, la sémantique y est

⁸⁴ [VIG92]

⁸⁵ Cf. §3.1.1.3

⁸⁶ [PER93]

ainsi hiérarchisée en conséquence. Chaque élément, accompagné d'un grand nombre d'illustrations, à l'instar du Dicobat, est décrit et différencié des autres auxquels il s'apparente.

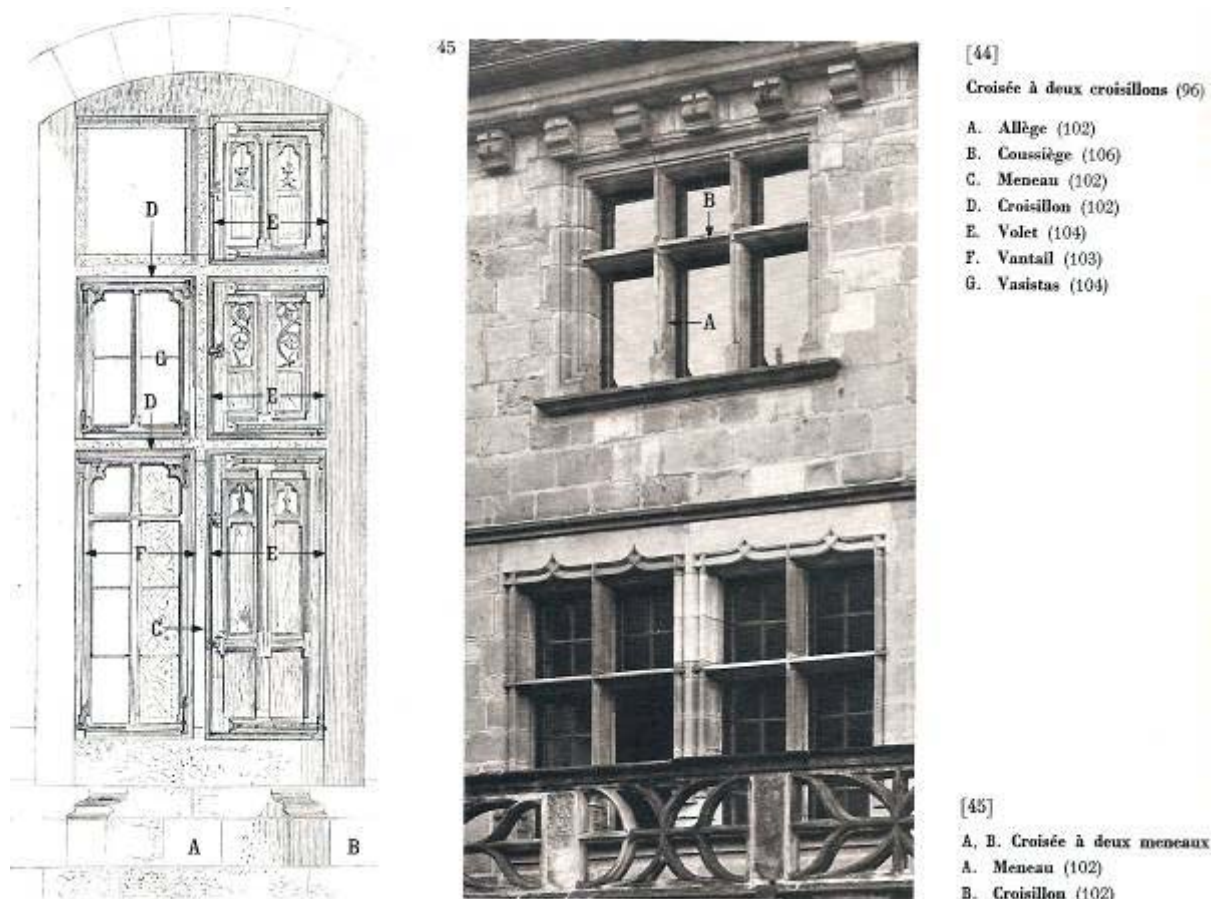


Figure 50 : la baie, illustration issue de *Principes d'analyse scientifiques, architecture, vocabulaire* [PER93]

4.2.2.1.3. Synthèse sur la sémantique

La sémantique, du fait de son appréhension aisée, se traduit facilement dans une interface numérique. Si l'on utilise l'organisation par niveau de détail des « principes scientifiques », on peut représenter la hiérarchie de l'ouvrage.

La sémantique architecturale constitue un moyen très performant de description de l'architecture. Néanmoins, Il faut considérer l'aspect peu communicatif de la sémantique seule. Dans cette perspective, elle est associée à des représentations bidimensionnelles dans les ouvrages monographiques par exemple. La sémantique

architecturale est donc un moyen de description efficace mais qui n'est pas autonome.

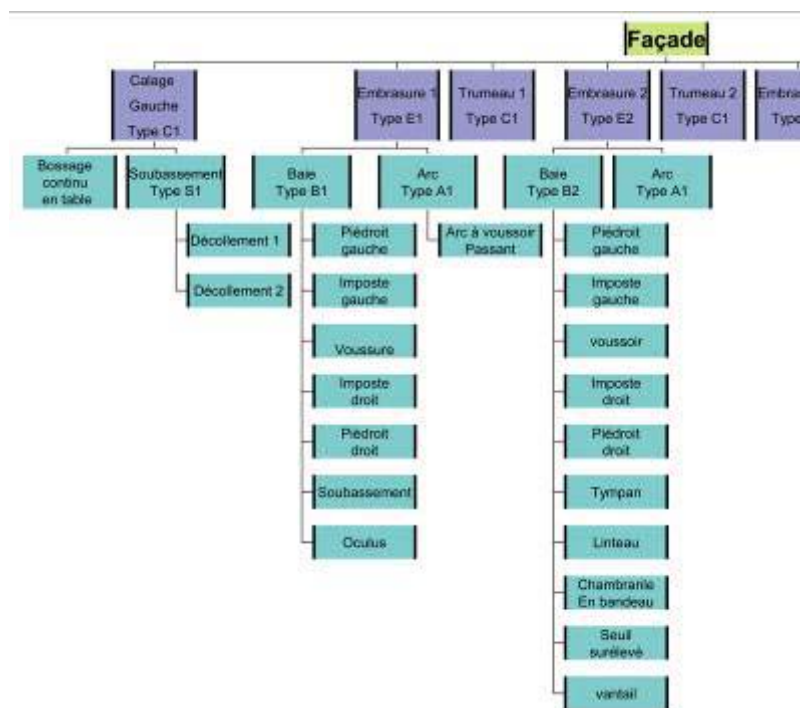


Figure 51 : extrait d'un arbre hiérarchique sémantique modélisant une façade d'ouvrage

4.2.2.2. Représentations traditionnelles 2D

Les éléments de représentation bidimensionnelle, tels que les plans, coupes et élévations sont les représentations les plus utilisées par l'architecte. Ces représentations véhiculent un grand nombre d'informations quant à la composition de l'ouvrage. L'élévation renseigne sur les relations entre les éléments : trames, niveaux par exemple. Le plan apporte des éléments de compréhension de la forme générale de l'ouvrage ainsi que la configuration des espaces. Les coupes verticales sur la façade par exemple définissent les relations entre moulures et niveaux, pour ne citer qu'elles. En tant que représentation d'un objet en trois dimensions, l'information bidimensionnelle est partielle, mais si l'on combine plusieurs éléments cohérents, il est possible d'obtenir des informations complémentaires pour le modèle. Lorsque l'on construit un modèle géométrique, la définition d'un élément en trois dimensions passe, la plupart du temps, par l'ajout d'une troisième dimension à une configuration en deux dimensions. Prenons l'exemple des principes de construction par balayage : on dessine le profil et on l'extrude le long d'un chemin. Pour un monument, la façade

réelle a été conçue à partir de plusieurs représentations en deux dimensions, mais la combinaison du plan et de la façade induit que les trois dimensions ont été définies.

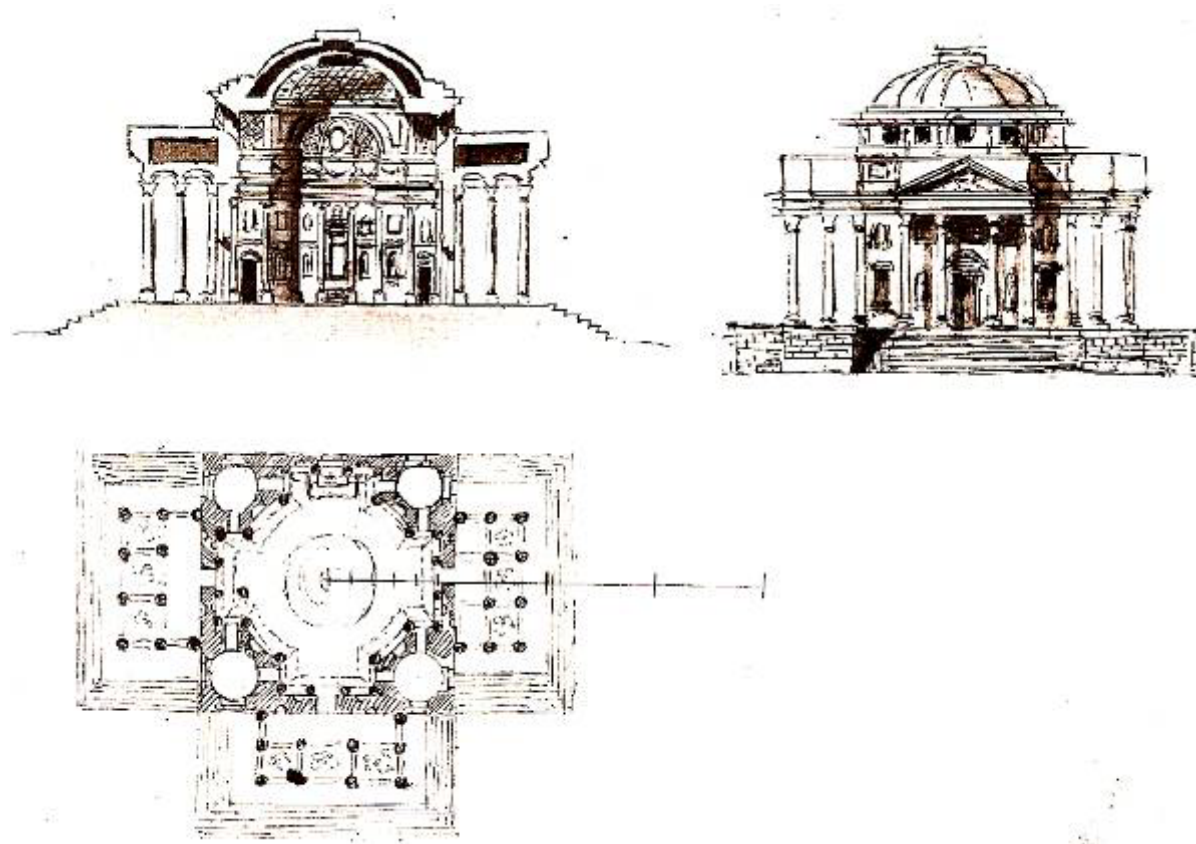


Figure 52 : représentation d'ouvrage en deux dimensions : plan coupe et façade (dessin anonyme, collection particulière) [PER93]

L'aspect formel des représentations conventionnelles représente une encapsulation des informations car elles sont une interprétation des principes de composition. Contrairement à la sémantique qui est aisément accessible mais qui ne permet pas de transmettre facilement les connaissances de par la spécificité du vocabulaire architectural, les représentations classiques communiquent de façon très efficace, mais les connaissances imbriquées ne sont pas accessibles sans un background préalable. L'utilisation de ces éléments de représentation est indispensable au vu de la place qu'ils ont au sein de la communication architecturale [TID96]. L'intégration d'informations en provenance de ce type de représentation est indispensable. L'approche pour utiliser ces informations se résume à deux moments. Le premier correspond à l'orientation de l'utilisateur dans la recherche des informations qui lui sont nécessaires : chaque étape de notre processus ne représente qu'une partie de

la problématique totale de modélisation, ce qui clarifie la recherche d'éléments relatifs à sa définition. Le second moment correspond à la traduction du principe recouvert. Ce passage de l'information bidimensionnelle à la géométrie tridimensionnelle doit se faire à condition que l'utilisateur perçoive un minimum de différences entre les deux représentations, via une projection temporaire du modèle par exemple. En effet l'intervention sur le modèle en trois dimensions, en vue d'ajouter des éléments exprimés en deux dimensions, sur une face par exemple, nécessite d'isoler la face pendant cette intervention.

4.2.2.3. Représentations tridimensionnelles

L'apport de la troisième dimension dans la représentation d'un ouvrage architectural se situe essentiellement au niveau de la compréhension formelle. Les représentations tridimensionnelles sont les outils de communication par excellence, car ils permettent une comparaison directe avec la forme réelle de l'ouvrage.

4.2.2.3.1. Maquettes

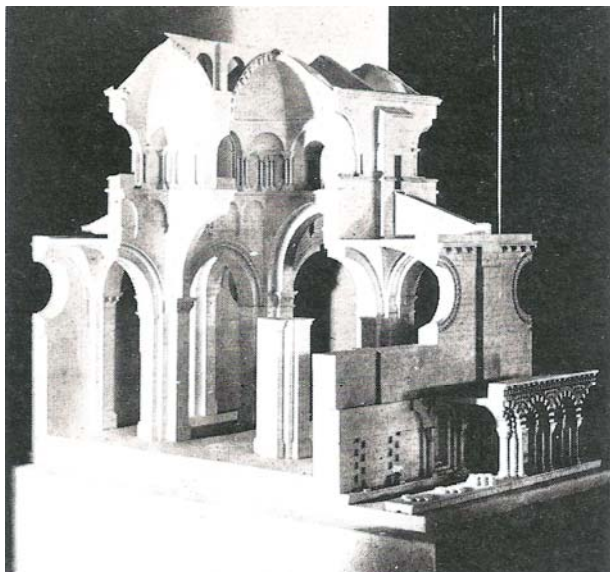


Figure 53 : maquette partielle d'un ouvrage [PER93]

Les maquettes de représentation, par opposition aux maquettes d'étude, visent en premier lieu à communiquer. L'information architecturale qui y est contenue, dépend de l'échelle de la maquette. Elle permet surtout l'appréhension des formes globales de l'ouvrage pour une première approche. Il n'est pas imaginable de vouloir récupérer d'autres informations d'un élément situé à la fin de la chaîne de représentation d'un ouvrage.

4.2.2.3.2. Numérique

Les informations tridimensionnelles numériques ne sont pas nécessairement les éléments les plus faciles à s'approprier, et ce, pour plusieurs raisons. Le format des données est un paramètre majeur à prendre en compte. L'interface doit pouvoir gérer l'importation des fichiers extérieurs à l'environnement de travail. De plus, notre proposition permet l'intégration de géométrie externe à deux niveaux. Lors la première étape, où il s'agit de déterminer la forme de départ, ce modèle initial peut provenir d'une maquette tridimensionnelle à l'échelle urbaine par exemple. La dernière étape, comme nous l'avons évoqué lors de son adaptation⁸⁷, prend en compte la possibilité d'importation de géométrie correspondant aux détails qui ne sont pas rationalisables. Dans ces deux cas d'importation, la géométrie est utilisée telle quelle. On s'intéresse à son aspect formel sans traduction autre que de format. La représentation tridimensionnelle numérique, au-delà de son intégration directe dans le modèle, a une valeur informative, comme pour les maquettes.

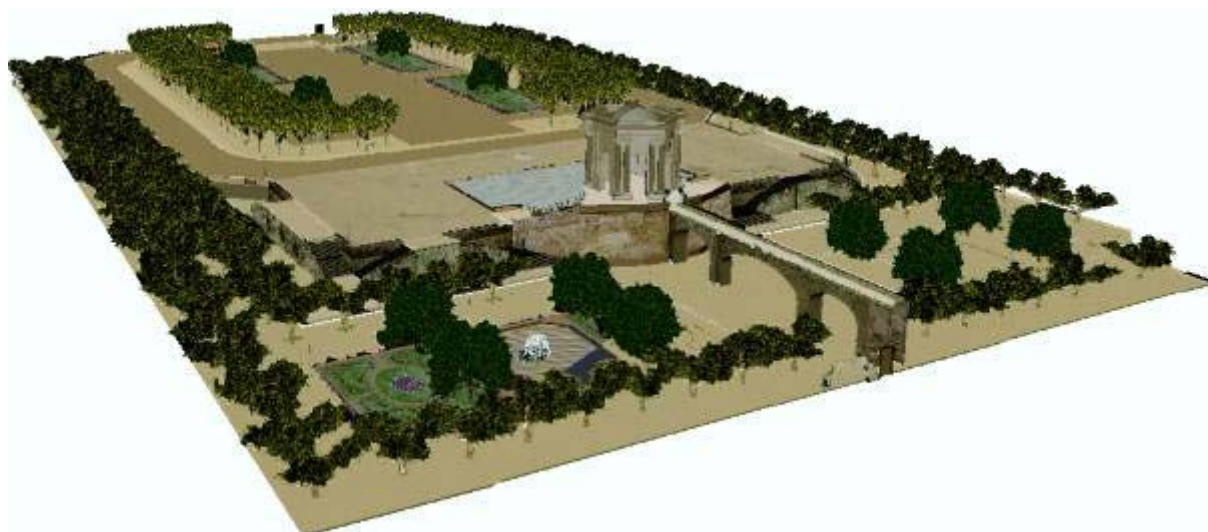


Figure 54 : représentation tridimensionnelle au format VRML de la promenade du Peyrou à Montpellier [ALB04]

Le nuage de points provenant du balayage laser en est un exemple. Si l'on met de côté les manques déjà évoqués⁸⁸, la visualisation du nuage de points global ou maillé permet d'obtenir un très grand nombre d'informations précises. Contrairement à la maquette dont l'objectif est de communiquer, le nuage de point est brut de

⁸⁷ Cf. § 4.1.4.5.2

⁸⁸ Cf. deuxième et troisième partie

mesure. L'information qu'il contient est uniquement le résultat de l'analogie entre forme et dimensions. En fonction de sa densité, il peut être utilisé comme modèle virtuel, ou comme une image. L'information que l'on récupère tient de la photo-interprétation. Les tentatives de récupération de connaissances architecturales à partir de représentations tridimensionnelles numériques sont à l'image du principe fondateur de l'informatique : cela tient du tout ou rien, l'information est soit bien représentée, mais inutilisable car en fin de processus de production (un rendu par exemple), soit dans un format d'échange adapté mais trop spécifique pour être utilisable directement (millions de points d'un nuage).

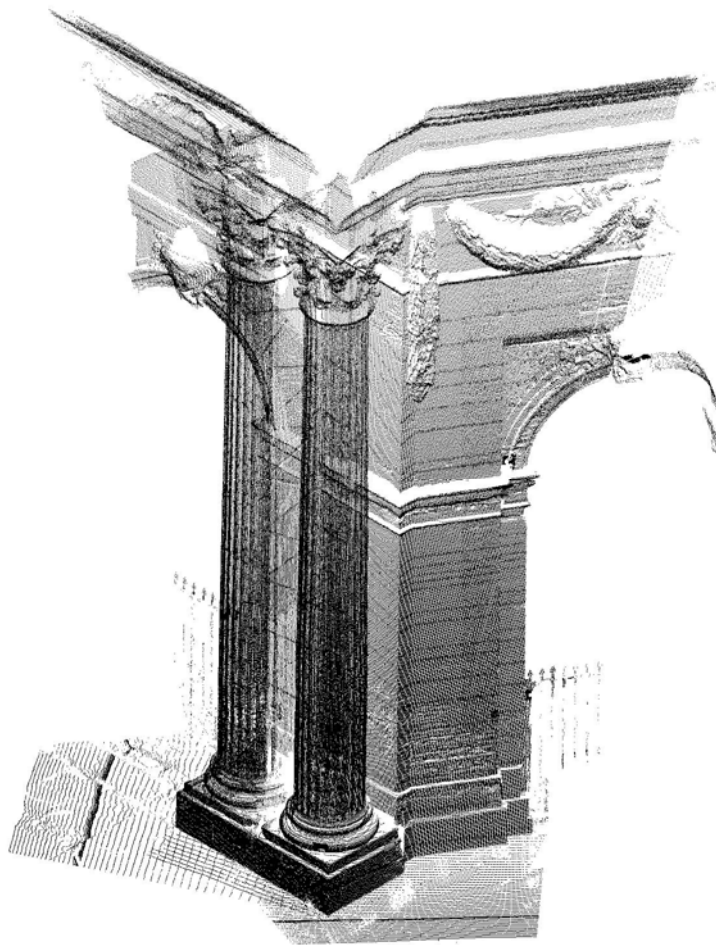


Figure 55 : nuage de point d'un angle du
château du Peyrou, Montpellier [ALB04]

4.3. Outils d'aide à la modélisation d'ouvrage bâti

Dans les chapitres précédents nous avons pu faire des constats concernant l'utilisation des techniques d'acquisition, la pratique de la modélisation et la nécessité de mettre en place un outil dont nous avons énoncé les principes au début de cette partie. Notre proposition est un essai d'intégration de la documentation dans son acception générale pour la formalisation d'un modèle architectural.

4.3.1. Trois concepts essentiels

Grâce à notre étude, trois concepts étroitement imbriqués émergent : à savoir, la démarche interdisciplinaire, la méthode reliant les deux domaines de l'architecture et la topographie et enfin un principe qui vise à apporter une solution à notre problème de modélisation d'ouvrage.

4.3.1.1. une démarche

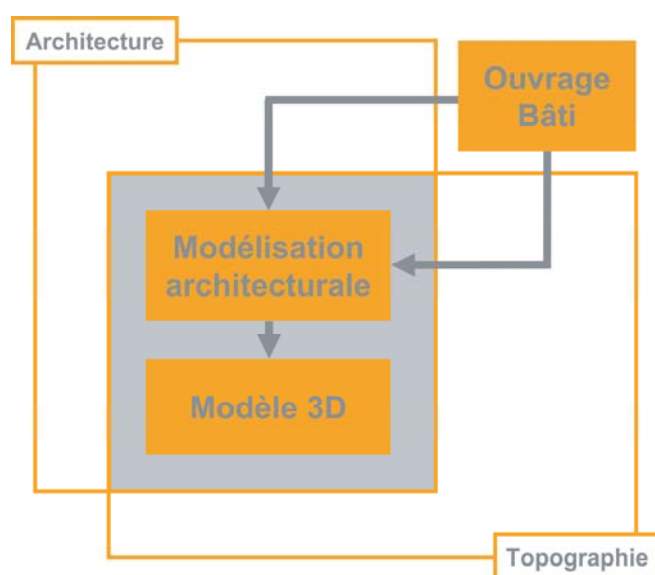


Figure 56 : interaction entre architecture et topographie

En tant qu'architecte chez les topographes, position certes particulière, il convenait dans notre démarche de recherche d'instaurer un échange entre les deux disciplines, tant sur le plan des connaissances que sur le plan méthodologique. Celles-ci, dans un second temps, se sont faites nôtres. Dès lors, nous nous sommes appropriées et nous avons tenté de les maîtriser,

qu'elles soient le fruit d'une démarche d'ordre architectural ou topographique. Nous pouvons citer comme exemple l'apprentissage des logiciels de photogrammétrie qui passe par la compréhension des principes qu'ils utilisent.

4.3.1.2. Une méthode

Le premier objectif étant de réussir à combiner les moyens actuels pour relever un bâtiment et de consigner le relevé de façon cohérente. La proposition d'analogie⁸⁹ entre conception architecturale et modélisation d'ouvrage bâti est directement liée à notre formation d'architecte et à notre vision de l'ouvrage par opposition aux moyens mis en œuvres dans les relevés topographiques.

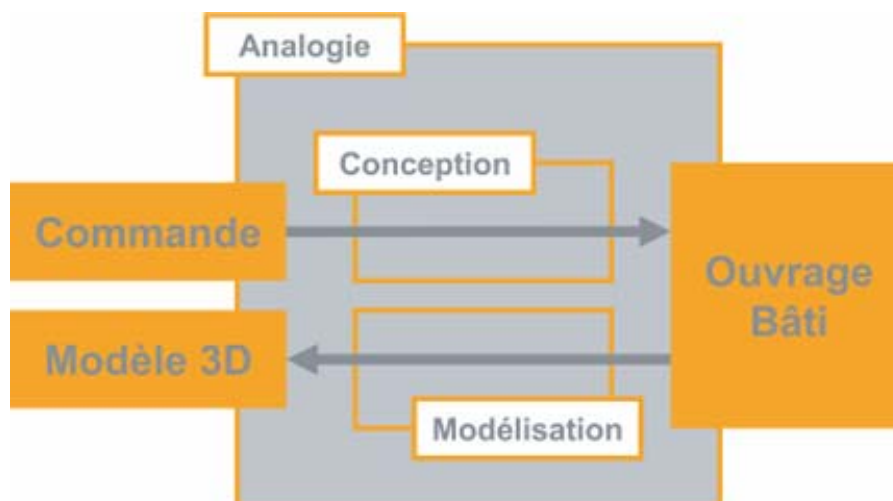


Figure 57 : méthode analogique de mise en place du processus de modélisation

4.3.1.3. Un principe

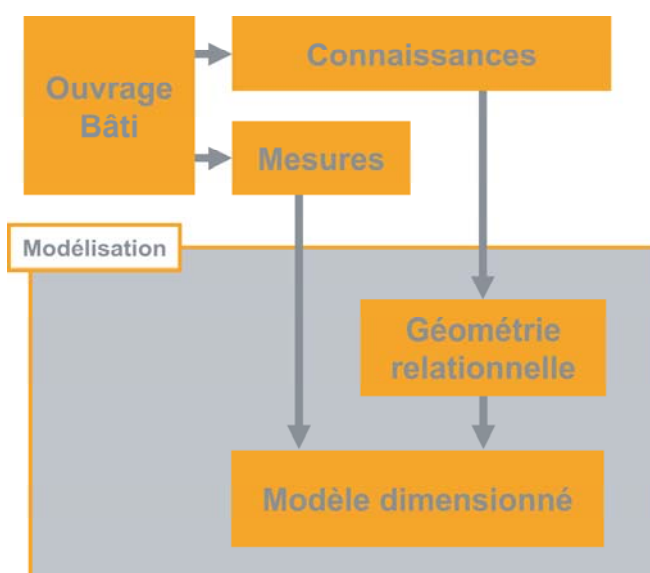


Figure 58 : définition de la géométrie antérieure au Dimensionnement

La règle qui consiste à définir la géométrie avant d'y intégrer les éléments de dimensionnement vient du souci de complétude, en réaction aux représentations partielles produites dans le domaine de l'acquisition à distance. Ce principe vient du constat que si l'on ne parvient pas à un modèle homogène, il suffit de le définir comme tel, sans recours aux données

⁸⁹ Cf. 4.1

mesurées, dans un premier temps, pour ensuite envisager la manière dont il est possible d'y ajouter le plus de mesures possible.

4.3.2. Deux publics visés

Après cette immersion dans le milieu de la topographie, qui a été le fil conducteur de notre recherche, il faut rendre accessible les résultats de cette étude aux deux publics principaux, les architectes et les topographes, chacun étant concerné par le relevé d'ouvrage.

4.3.2.1. Architectes

Les architectes ont les moyens, de par leur formation, d'appréhender le relevé d'un ouvrage bâti et d'en réaliser le modèle géométrique. Ils n'ont pas, pour une grande majorité d'entre eux, l'habitude de gérer les différentes techniques d'acquisition et surtout la multitude des données produites et les principes qui en découlent.

4.3.2.2. Topographes

Le spectre d'application des connaissances liées à la mesure du réel, domaine propre aux topographes, est très large. La modélisation architecturale en fait partie. Il a été plusieurs fois question des particularités des ouvrages architecturaux⁹⁰, particularités qui ne sont pas aisément maîtrisables autrement que par la pratique et la documentation relatives à l'architecture.

Notre proposition vise à encadrer le mieux possible les deux approches et les complexités qui les particularisent : comment manipuler les quantités et diversités des données. Comment les organiser de façon cohérente avec l'objet architectural considéré ?

4.3.3. La base de données comme lieu de regroupement des connaissances

La mise en pratique de la théorie, qui passe par le développement d'un outil de gestion de la modélisation à base de combinaison de techniques d'acquisition, impose l'organisation de la géométrie avec les moyens existants qui nous paraissent

⁹⁰ Cf. §2.1.5.2, §3.1.2, §3.2.3 et §4.1.1

efficaces. Les éléments de géométrie sont stockés dans des bases de données intégrées aux logiciels de modélisation. Leur accessibilité n'est pas toujours très commode et leur spécialisation ne les rend pas utilisables aisément, c'est pourquoi il est préférable de créer une base de données propre à l'outil.

Celle-ci représente le moyen de combiner tous les éléments de notre processus, aussi bien la géométrie que les relations entre les objets que les données dimensionnelles.

4.3.3.1. Informations sémantiques

La sémantique joue un rôle important dans notre approche de modélisation. Celle-ci consiste à guider la traduction de connaissances architecturales encapsulées de différentes manières⁹¹ et d'intégrer les principes recouverts dans le modèle géométrique pour une cohérence élevée du relevé.

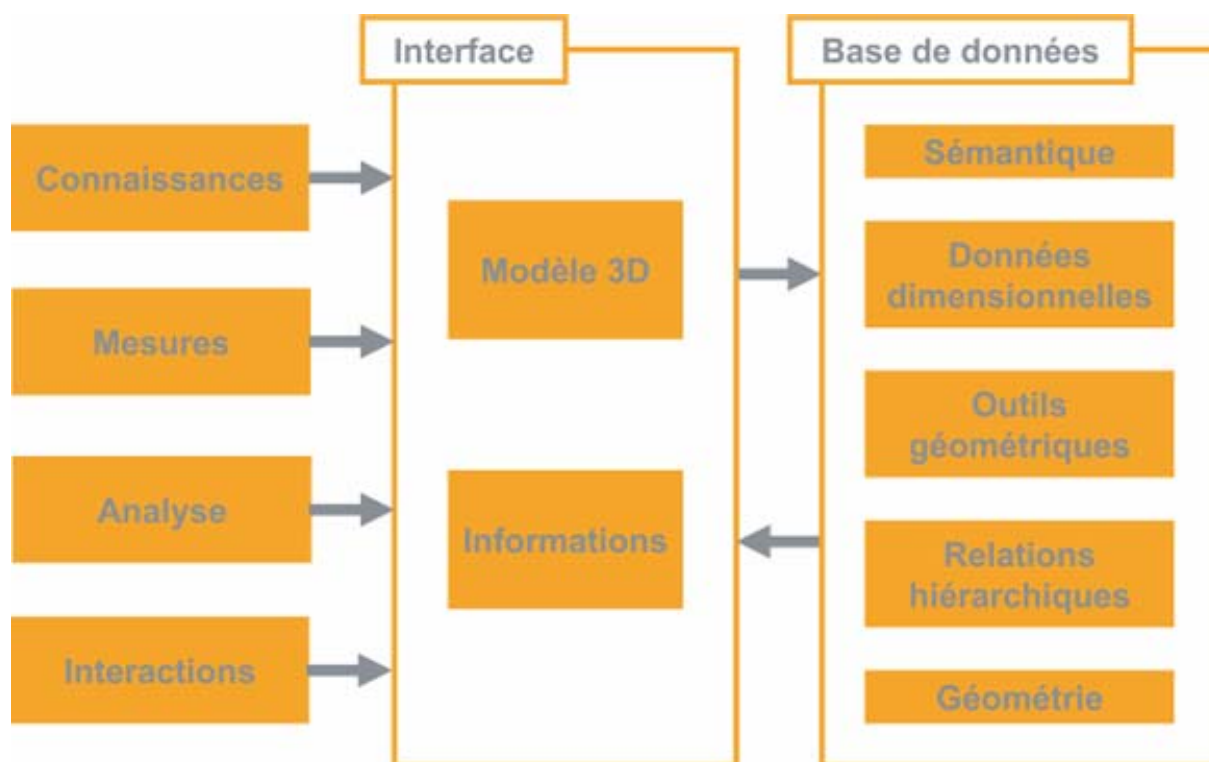


Figure 59 : la base de données comme instrument de synthèse

On peut s'interroger sur la manière dont ces connaissances peuvent être exploitées au mieux. Nous avons vu que la sémantique est une solution efficace pour décrire

⁹¹ Cf. §4.2

tout ouvrage architectural grâce à la richesse du vocabulaire qui renvoie aux différents éléments du bâtiment⁹². Nous proposons dans notre étude d'attribuer à chaque élément modélisé sa correspondance sémantique appropriée. L'intérêt de cette démarche est qu'elle introduit la notion de contrôle de la modélisation : si nous parvenons à nommer chaque élément que nous définissons, c'est qu'il existe. Dans le cas contraire, l'objet considéré n'est probablement pas représentatif d'un ouvrage bâti. La sémantique est ainsi utilisée comme outil de validité de la modélisation architecturale. Elle fait partie intégrante du modèle : elle doit donc être enregistrée dans la base.

4.3.3.2. Relations hiérarchiques

Les cinq étapes du processus proposé fonctionnent par niveau de détail croissant. La géométrie obtenue à la fin d'une phase est utilisée comme support à la définition de la suivante. Les éléments de géométrie ont ainsi une filiation directe entre eux tout au long de la modélisation. Cette relation hiérarchique est indispensable à la compréhension du modèle. Elle doit de même être consignée dans la base de données. Ainsi, les détails sont issus des transitions et positions qui proviennent de l'insertion des baies, entre autres. Celles-ci descendent des subdivisions de chaque façade composant le bâtiment.

4.3.3.3. Outils géométriques particuliers

Il a été conclu précédemment qu'il revenait à l'outil que nous proposons, de permettre l'intégration des connaissances difficiles à acquérir, ce qui nécessite la création d'outils particuliers⁹³. Ces derniers ont pour mission de mettre en forme la géométrie selon des principes architecturaux. Ils peuvent être utilisés de manière particulière pour chaque étape. La base de données enregistre la géométrie qui correspond à l'état ; cette géométrie est particulière, car issue de la traduction de connaissances architecturales. Pour la qualification de la géométrie, il est important qu'il subsiste la trace de sa construction. Les outils étant spécifiques,

⁹² Cf. §4.2.2.1

⁹³ Cf. §4.2.2.2

l'enregistrement dans la base de données de leur utilisation, associé à la géométrie produite, est révélateur de l'enrichissement du modèle⁹⁴.

4.3.3.4. Regroupement des données dimensionnelles

La base de données permet encore de stocker les différents éléments dimensionnels utilisés pendant les dimensionnements respectifs du modèle. Chaque composant géométrique est associé à une partie des données lui correspondant, ainsi qu'au niveau de détail nécessaire. L'intégration de ces données est indispensable au modèle tout autant que la sémantique.

4.3.3.5. Instrument de synthèse

La base de données, en définitive, est le lieu de convergence de tous les éléments combinés et produits pendant ce processus de modélisation. Elle rend possible le rassemblement, le stockage, la mise en relation et l'accessibilité de tous les éléments nécessaires au modèle final.

4.3.4. Mise en place d'un outil de gestion du relevé architectural

L'outil de modélisation doit comporter une interface de visualisation et de gestion de la géométrie. Elle doit permettre l'accès et la gestion de la base de données définie précédemment⁹⁵.

4.3.4.1. Logiciel d'accueil

Le travail sur l'interface de visualisation et de gestion de la géométrie n'est pas l'objectif de notre étude, c'est pourquoi il a fallu choisir un logiciel de modélisation existant selon des critères qui ont abouti au choix d'AutoCAD. Ce dernier est un compromis entre une manipulation de la géométrie efficace, une interface de programmation intégrée et une gestion des formats standard⁹⁶.

⁹⁴ Cf. §4.3.5

⁹⁵ Cf. § 4.3.3

⁹⁶ L'aspect visuel des outils développés est présenté en annexe B

4.3.4.1.1. Manipulation de la géométrie

Comme il avait été conclu précédemment⁹⁷, nous avons choisi de privilégier une interface de modélisation impérative pour mettre en place notre outil. AutoCAD n'est pas un logiciel de modélisation très performant : d'autres logiciels tels que MAYA [MAY06] et 3DSMAX [MAX06] offrent des possibilités plus étendues pour la modélisation tridimensionnelle. Toutefois, le choix d'AutoCAD [AUT06] se fait pour sa polyvalence quant aux critères que nous avons énoncés⁹⁸ et non pour ses performances comme outil de modélisation.

4.3.4.1.2. Programmation

La particularité des outils dont nous avons besoin, nécessite la création de procédure spécifique et la gestion de la base de données externe. AutoCAD permet de programmer, essentiellement dans deux langages : AutoLisp et VisualBasic. Autolisp, comme les autres langages de développement internes des logiciels tels que Maya et 3DSMAX, est un accès sur l'interface de modélisation et permet des personnalisations intéressantes : tout ce que l'utilisateur fait peut être programmé. La mise à disposition de VisualBasic pour application au sein d'AutoCAD est un excellent moyen, en plus de disposer d'une interface de développement performante, de mettre en relation AutoCAD et toutes les applications Microsoft par l'API Windows. Cette passerelle a orienté par conséquent notre choix vers le développement des outils en VisualBasic.

4.3.4.1.3. Gestion de formats standard

Par ailleurs, AutoCAD est un logiciel très répandu. Son rayonnement est tel que les formats dans lesquels on peut enregistrer, sont proposés comme formats d'export par un très grand nombre de logiciels manipulant la géométrie. L'intérêt pour de cette position dominante sur le marché réside donc dans la facilité à récupérer le plus de données géométriques possibles.

Le choix d'AutoCAD ne s'explique donc pas par ses performances dans un domaine particulier, mais surtout par la possibilité qui nous est offerte de pouvoir faire le maximum de choses sans se disperser dans le développement d'éléments

⁹⁷ Cf. § 3.4.1.4

⁹⁸ Cf. § 3.4.1.4

manquants, ce qui se produirait dans une interface de programmation séparée du modeleur.

4.3.4.2. Type d'entités géométriques

Le choix du type d'entité géométrique oriente grandement le modèle obtenu. Nous avons vu que le meilleur type géométrique est le solide⁹⁹. Cependant, la capacité des ordinateurs actuels ne permet pas la gestion d'un modèle d'un objet complexe tel qu'un bâtiment. Un modèle de type surfacique est donc celui qui, de nos jours, est le plus adapté pour permettre la représentation d'un ouvrage bâti. Les surfaces peuvent être décrites par des entités plus ou moins complexes.

Etant donné qu'il s'agit, dans la perspective de notre problématique, de représenter un jeu de données [LUC06], l'utilisation de surfaces paramétrées, telles que les Nurbs, est appropriée [REM03]. On traduit un objet complexe par un autre objet complexe.

Dans notre cas, cet outil permet une décomposition de cette complexité pour permettre une description de l'ouvrage et une intégration progressive des données dimensionnelles. L'utilisation d'objets géométriques simples tels que les faces 3D, se justifie [WEI04]. Chaque face décrit une subdivision architecturale pour un niveau de détail donné. L'utilisation de surfaces paramétrées telles que les NURBS¹⁰⁰ n'est pas à négliger pour autant. En effet, lorsqu'il s'agit d'intégrer un élément de détail non décomposable, ce type de représentation convient pour finaliser le processus que nous décrivons.

L'utilisation de faces pour décrire des éléments architecturaux peut s'avérer réducteur à certain moment : la description de portions courbes, telles que des arcs, soulève un problème de représentation d'objet non plans. La discrétisation liée à un usage plus important de polygones que de surfaces paramétrées est directement la cause de cette gêne. Le nombre de faces nécessaires à la description d'une surface courbe est beaucoup plus important que pour décrire une portion plane. Le contenu sémantique pour décrire l'un ou l'autre est équivalent. On a dans ce cas une

⁹⁹ Cf. § 3.4.2.3

¹⁰⁰ NURBS : Non-Uniform Rational B-Splines. Ce sont des surfaces rationnelles, à base de courbes paramétriques.

disproportion entre la description sémantique et la description géométrique : plusieurs éléments géométriques étant nécessaire à la description d'un seul objet, la sémantique ne peut les désigner tous. L'utilisation de surface paramétrée pour la description d'éléments courbes permettrait de garder ce rapport entre deux types de description. L'aspect combinatoire de notre étude impose une maîtrise de plusieurs notions liées aux techniques de mesures associées à la manipulation de connaissances architecturales. La gestion d'objets paramétriques, au niveau de la programmation, relève de recherches spécifiques qui alourdiraient notre étude [MEY03] sans apporter de validation supplémentaire à notre travail. Par conséquent, cette simplification est due à un choix de développement, également lié à l'environnement de recherche, à savoir AutoCAD.

4.3.4.3. Gestion du modèle architectural

Comme il a été vu, la gestion du modèle architectural se fait à l'aide d'une base de données¹⁰¹. Celle-ci autorise la mise en relation de toutes les informations concernant l'ouvrage à modéliser et qui peuvent être traitées, traduites et gérées par ce biais. La base de données est un lieu de rencontre, de combinaison.

4.3.4.3.1. Faces

Dans le paragraphe précédent, la face 3D est décrite comme l'entité géométrique la plus proche de nos besoins en vue de la complexification progressive du modèle¹⁰². La base se structure dans l'enregistrement des propriétés la concernant. La table permettant le stockage des caractéristiques des faces se trouve au centre de l'organisation des informations. Dans AutoCAD, les objets « Face 3D » ne peuvent pas être composés de plus de quatre sommets. Si une face a quatre sommets ; elle peut être gauche¹⁰³. Une telle face est alors décomposable en deux faces à trois sommets (méthode dite de triangulation).

4.3.4.3.2. Lieux géométriques

La séparation, entre d'une part la mise en relation et d'autre part le dimensionnement de la géométrie, qui est effectuée dans ce travail, doit être détaillée par rapport aux

¹⁰¹ Cf. § 3.4.4.2 et § 4.3.3

¹⁰² Cf. § 4.3.4.2

¹⁰³ Non plane

faces 3D que nous employons. Chacune est décrite par ses sommets. Lors de la création de face dans un logiciel de modélisation, chacune a ses propres sommets, indépendamment des autres entités. Ce que nous proposons pour l'optimisation de la gestion du modèle relationnel correspond à la définition de lieux géométriques à la place de l'enregistrement de tous les points dans la base. Le modèle relationnel est cohérent : il n'y a pas de discontinuité assimilable à un trou dans la surface. Par conséquent, toutes les faces se touchent. Elles ont donc des sommets qui se confondent. Cette superposition de sommets révèle, ainsi, le phénomène d'adjacence entre faces ; c'est pourquoi nous introduisons ici la notion de lieux géométriques. La définition de lieux à la place de l'enregistrement de toutes les coordonnées dans la base permet d'utiliser cette propriété à l'aide de requête simple sur la base. Toutes les faces, faisant référence au même lieu, sont adjacentes. Ainsi, deux ou plusieurs points confondus constituent un lieu géométrique unique. La redondance des points est ici évitée, et surtout, la relation d'adjacence conservée en cas de modification de position d'une face par rapport aux autres.

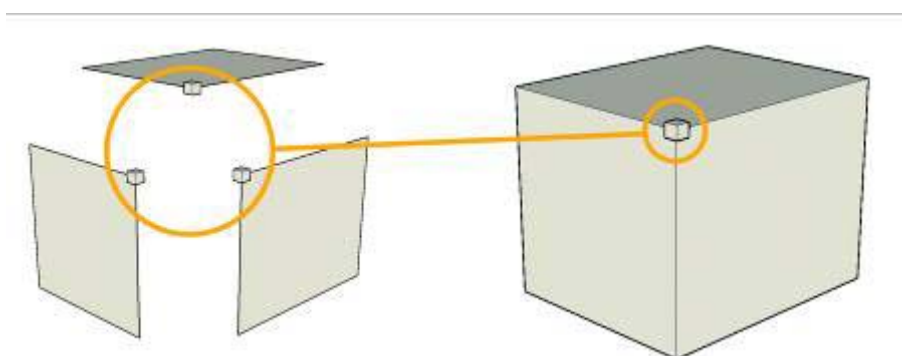


Figure 60 : le point comme sommet de face ou comme lieu géométrique

4.3.4.3.3. Données tridimensionnelles

Les données tridimensionnelles issues soit de mesures photogrammétriques, soit de d'acquisition à balayage, permettent de positionner les lieux en fonction de leur appartenance aux faces. Ces informations doivent être intégrées au modèle architectural pour l'aspect dimensionnel. L'enregistrement des données dans la base n'est pas suffisant pour les rendre utilisables. Il faut les transformer pour les adapter aux faces géométriques.

4.3.4.3.4. Le plan comme intermédiaire :

Les jeux de données servent de contrainte aux faces du modèle géométrique afin que celui-ci corresponde aux dimensions de l'ouvrage mesuré. Les faces préexistent par rapport à la phase d'intégration des données : elles ont été créées antérieurement à l'intégration des données. La géométrie n'est donc pas le résultat du traitement des données. Il s'agit d'utiliser un intermédiaire qui a un rapport avec les deux entités que l'on souhaite relier. La simplicité des faces que l'on utilise dans notre processus trouve un intérêt supplémentaire ici : il est possible de les assimiler à des plans. Le plan est un concept géométrique qui permet de décomposer un grand nombre d'entités architecturales. Il est aussi aisé d'extraire des plans moyens d'un jeu de données [DRA00]. Le plan se trouve être ainsi un intermédiaire pertinent entre le modèle relationnel et les jeux de données.

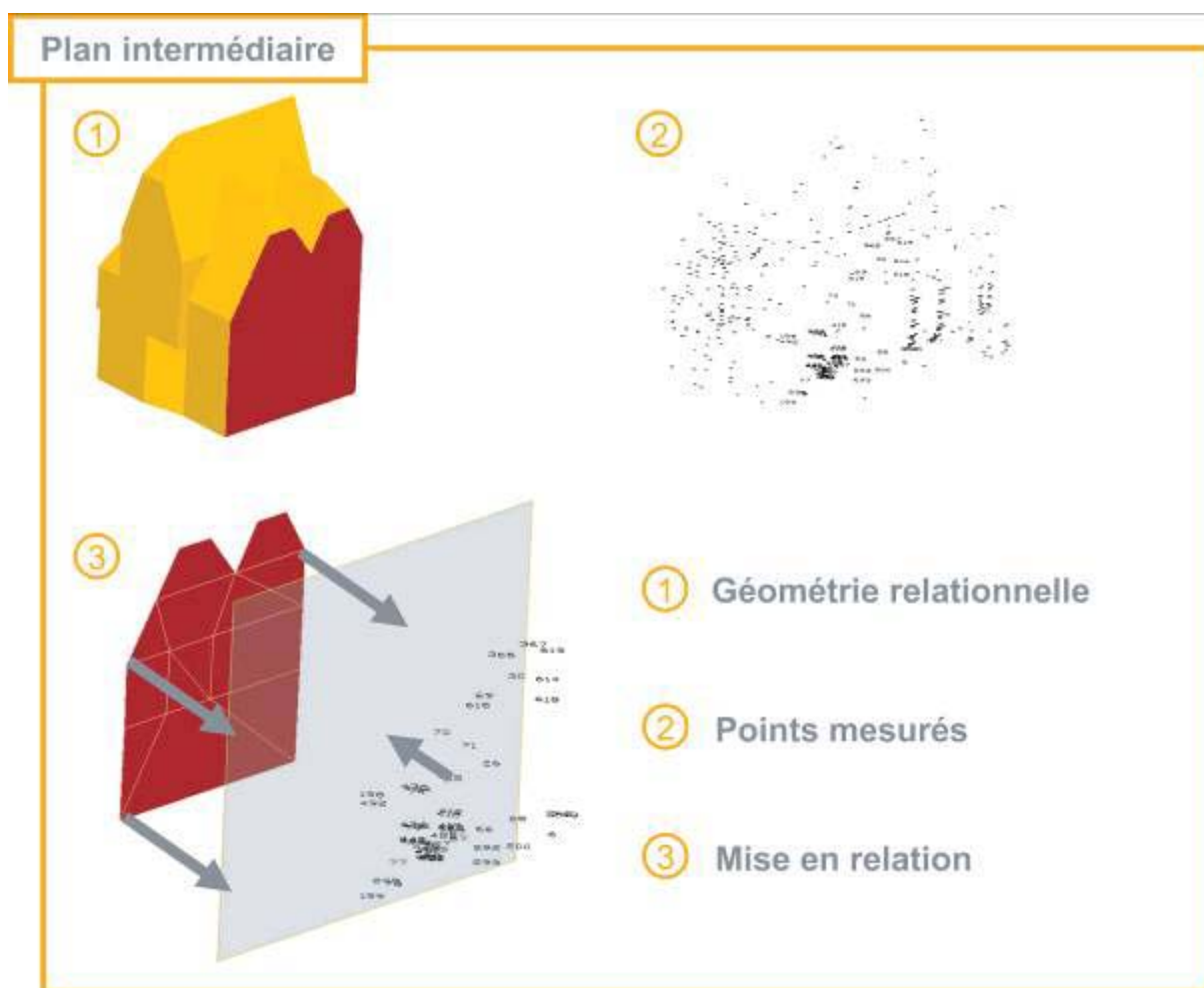


Figure 61 : le plan permet de mettre en relation un jeu de données segmenté avec les faces correspondantes

4.3.4.4. Dimensionnement des faces

L'élément géométrique que l'on manipule et qui représente chaque élément de l'objet architectural est une face. Celle-ci est définie par des fonctions de mise en relation de la géométrie basée sur des connaissances architecturales. Il faut pouvoir repositionner chaque face dans l'espace du modèle au moment de la phase de dimensionnement, c'est pourquoi on introduit la notion de plan de référence.

4.3.4.4.1. Plan de référence

En géométrie, aussi bien qu'en architecture, dès qu'il s'agit de définir un objet dans l'espace, on le fait grâce à un plan. Lors de la segmentation d'un nuage de point, on définit des plans de référence, correspondant au plan de la façade. Les logiciels de traitement de nuage de points permettent de sélectionner des ensembles par le choix de trois points appartenant au plan composé d'un grand nombre d'autres points.

4.3.4.4.2. Association plan / Face

La définition de plan de référence est issue de la segmentation : on rassemble les données pour les grouper. Pour dimensionner les faces définies, on les associe aux plans de référence créés à cet effet. Les configurations de la géométrie rendent nécessaire la création des plans de référence. Il est possible d'associer plusieurs faces, à condition qu'elles soient coplanaires au même plan de référence.

4.3.4.4.3. Validation pragmatique

La première validation de la géométrie se fait par l'association entre sémantique et Face 3D. Cette validation est théorique : on vérifie si les connaissances architecturales sont bien appliquées. L'association de Faces 3D à un plan de référence définie par les données dimensionnelles correspond à une confrontation entre l'interprétation de l'ouvrage et la réalité. Ainsi, le niveau de détail mis en place est soumis à une validation par le réel.

4.3.5. Définition puis dimensionnement : expérimentation

Le projet de modélisation des bâtiments du lycée des Pontonniers, à Strasbourg, nous a permis de tester le dimensionnement appliqué à une géométrie déjà

définie¹⁰⁴. Il faut préciser que ce projet correspond à une mission du laboratoire ; il y a donc des objectifs à atteindre, et, de ce fait, une obligation de résultat. L'utilisation de ce projet comme expérimentation ne doit pas prendre le dessus sur le modèle à fournir. Il faut donc profiter de l'opportunité de ce projet sans chercher à influencer le résultat escompté. En effet, l'expérimentation ne se traduit pas toujours par un résultat positif, ou approprié.

4.3.5.1. Niveau de détail spécifique :

Les modèles à réaliser pour ce projet doivent permettre de renseigner l'utilisateur sur le contenu des parties de chaque ouvrage. Le modèle géométrique est une interface pour permettre le choix des parties renseignées. L'organisation de la mission est à diviser en deux parties. La première a consisté à mettre à la disposition les ortho-photos des façades principales et ensuite à réaliser les modèles des différents bâtiments qui sont au nombre de six. Le niveau de détail demandé correspond à la deuxième étape de notre processus¹⁰⁵. Les ortho-photos étant faites, il devenait intéressant de les intégrer au modèle pour le texturer. L'intégration des textures dès le départ était indispensable, pour éviter, en dernier ressort, le placage de texture¹⁰⁶ sur chaque face. L'utilisation des ortho-photos pour texturer un modèle permet de modéliser, avec une certaine approximation, des grandeurs réelles, et ce dès le début. La texture a pu être utilisée en tant qu'aide à la modélisation. La gestion des textures dans AutoCAD n'étant pas intégrée dans notre processus, le logiciel Sketchup lui a été préféré pour la modélisation. Le modèle a été fabriqué selon les principes du processus proposé dans cette étude. Le niveau de détail étant peu élevé mais suffisant par rapport à la finalité du modèle, la texture permet d'apporter un grand nombre d'informations qui fournissent des renseignements quant à la constitution des ouvrages modélisés.

¹⁰⁴ L'adaptation de notre processus à ce projet est présenté en annexe C

¹⁰⁵ cf. 4.1.4.2

¹⁰⁶ « Le placage de texture (texture mapping) est la plus simple et la plus ancienne des techniques à base d'images. Le principe est de remplacer un objet géométrique complexe par un objet plus simple sur lequel on applique une image de la surface de l'objet complexe d'origine. C'est une technique puissante et éprouvée, actuellement intégrée dans toutes les cartes graphiques qui obtiennent dans ce domaine des performances impressionnantes et toujours croissantes. » [Por04]

4.3.5.2. Application des deux premières étapes du processus

La nécessité de définir les façades principales au début du processus de modélisation est renforcée ici par la préexistence de l'ortho-photo. La face recevant l'image correspond à la face initiale déjà décrite¹⁰⁷. Si nous prenons un des bâtiments des Pontonniers en exemple, la première étape étant aboutie, la seconde peut être appliquée. L'image sert, de ce fait, de support au découpage de la façade. Il faut noter l'interpénétration¹⁰⁸ entre les niveaux courants et les pans de toitures. Cette caractéristique induit la non définition des deux pans principaux de toiture pendant la première étape. En effet, la prise en compte de la complexité de leurs divisions est plus appropriée dans la seconde phase.



Figure 62 : utilisation de l'ortho-photo préexistante comme aide au découpage des façades

4.3.5.3. correspondance entre modèle et jeu de données

La définition de la géométrie ayant eu lieu avant l'utilisation des données dimensionnelles, il convient de vérifier la possibilité d'association entre géométrie relative et données : les faces géométriques ont-elles été créées de façon cohérentes ? L'association rendue ou non possible permet de le savoir.

¹⁰⁷ Cf. § 4.1.4.2

¹⁰⁸ Cf. Figure 21

4.3.5.3.1. Jeux de données :

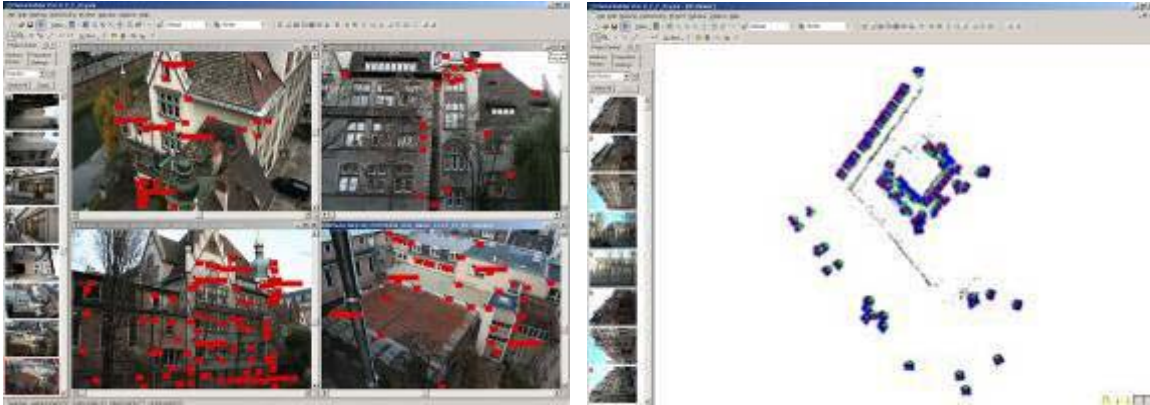


Figure 63 : données photogrammétriques du projet des Pontonniers

Les données utilisées pour ce projet sont issues de la photogrammétrie. Un jeu de données laser a été réalisé postérieurement au cadre de l'étude et nous permet ici, de valider le principe utilisant conjointement les deux techniques. On dispose donc d'un semis de points provenant du logiciel Photomodeler, d'une part, et un nuage de point laser d'autre part.

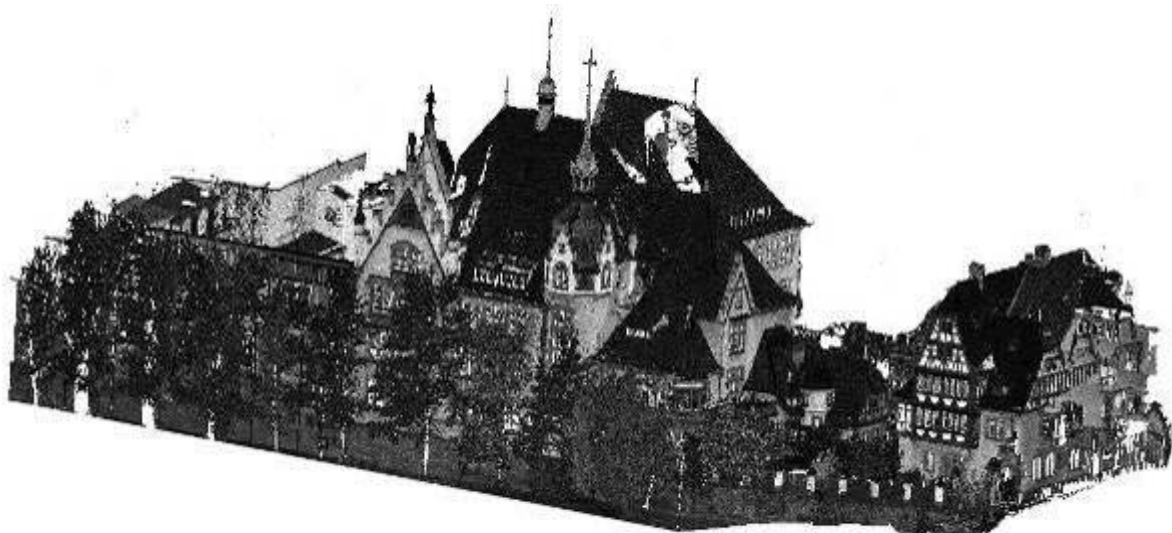


Figure 64 : nuage de points de l'ensemble des bâtiments du lycée des Pontonniers de Strasbourg

4.3.5.3.2. Deux types de mise en contrainte dimensionnelle :

Dans un premier temps, l'expérimentation se fait de façon manuelle : la mise en contrainte manuelle du modèle ne prend en compte que la faisabilité de l'association et révèle la pertinence de la modélisation préliminaire. Elle a été faite dans le cadre du projet, car l'automatisation étant en phase de test, les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants pour le rendu du modèle.

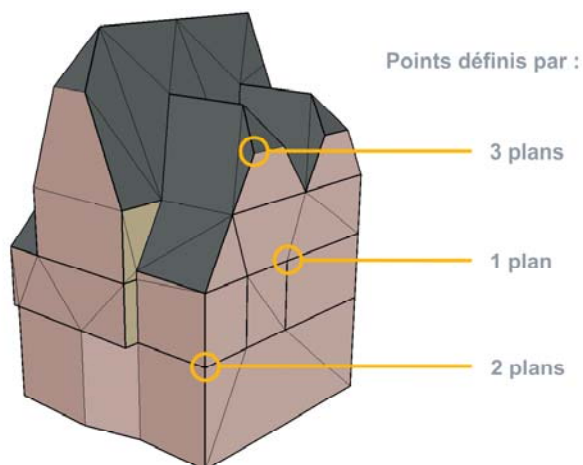


Figure 65 : les trois types de définition de points

Ensuite, nous mettons en place une mise en contrainte automatique : L'automatisation permet, en plus de la validation de la modélisation préliminaire, de faciliter l'intervention de l'utilisateur. Pour la rendre possible, il faut énoncer le cadre et les différents cas de figure à gérer. Les faces sont définies par leurs sommets, dont la position caractérise la forme et l'emplacement de la face

géométrique. La position des sommets peut se déterminer à l'aide de trois modes différents. Le plus performant réside dans la définition de la position du point par au moins trois plans. Un point peut se situer sur une arête du modèle, et par conséquent, n'appartenir qu'à deux plans (une droite). Cette arête est délimitée par deux points correctement définis. La position du point peut, ainsi, être énoncée en fonction de ces deux points, en exprimant le rapport des distances. Enfin, un point peut appartenir à un seul plan. Sa position se traduit alors en relation avec trois points mieux définis et positionnés sur le même plan. La façon de définir un point, en fonction d'un de ces trois cas, nécessite l'association des points avec les plans définis par le jeu de données. La relation entre le plan de référence et les points se fait par l'intermédiaire des faces géométriques. Ces entités assurent l'analogie entre la géométrie et l'architecture ; ce sont elles qui permettent la combinaison des informations de toutes sortes pour l'élaboration du modèle.

4.3.5.4. Le modèle comme aide à la segmentation

Le jeu de données issu du scanner laser ayant été effectué après la finalisation du modèle¹⁰⁹ nous est néanmoins utile pour l'expérimentation. Il est possible de vérifier si le modèle, à un niveau de détail donné, peut servir d'aide à la segmentation. Cette dernière consiste, comme on l'a vu¹¹⁰, à diviser le nuage de points en sous parties logiques, jusqu'au niveau de détail souhaité. La préexistence du modèle par rapport au traitement des données impose à la phase de segmentation, la récupération des données nécessaires au dimensionnement de chaque face. Il s'agit donc de séparer les plans qui définissent au mieux chaque face. Les points correspondant à ces caractéristiques sont isolés et enlevés du nuage. Dans cette perspective, la segmentation se fait sous la direction de la visualisation du modèle. Nous pouvons ainsi dégager un premier point fort de cette interaction entre modèle et données : la récupération de données significatives est aisée, puisque le modèle guide la segmentation. Le deuxième élément important consiste à simplifier le jeu de données, ce qui a lieu au fil de chaque étape. En effet, la majeure partie des points du nuage se situe sur les plans principaux des façades. Si on isole ces points dès la première étape, le jeu est allégé et d'autant plus manipulable. Chaque étape contribue à l'allègement du jeu de données. Le troisième point fort vient directement du résultat de la segmentation effectuée à chaque étape : le nuage de point résultant correspond à ce qu'il reste à modéliser dans les étapes suivantes.

4.3.5.5. Conclusion sur le dimensionnement

Le projet de modélisation du lycée des Pontonniers a permis l'expérimentation de plusieurs éléments constitutifs de notre proposition de processus de modélisation par étape. Malgré le faible niveau de détail nécessaire pour le modèle et l'impossibilité d'utiliser l'interface choisie pour le développement (AutoCAD), quelques caractéristiques du processus proposé ont pu être vérifiées. Le dimensionnement d'un modèle préexistant d'ouvrage bâti peut se faire de façon semi-automatique, en associant les faces du modèle aux plans de référence auxquels elles appartiennent. Ces plans de référence sont définis par le jeu de données préalablement segmenté en fonction du modèle. De plus, la modélisation relationnelle précédant le

¹⁰⁹ L'achat du Laser étant postérieur au début du projet.

¹¹⁰ Cf. § 2.2.3.2

dimensionnement permet de gérer la segmentation de façon aisée. Celle-ci permet de situer le reste du travail de modélisation par rapport aux données non utilisées.

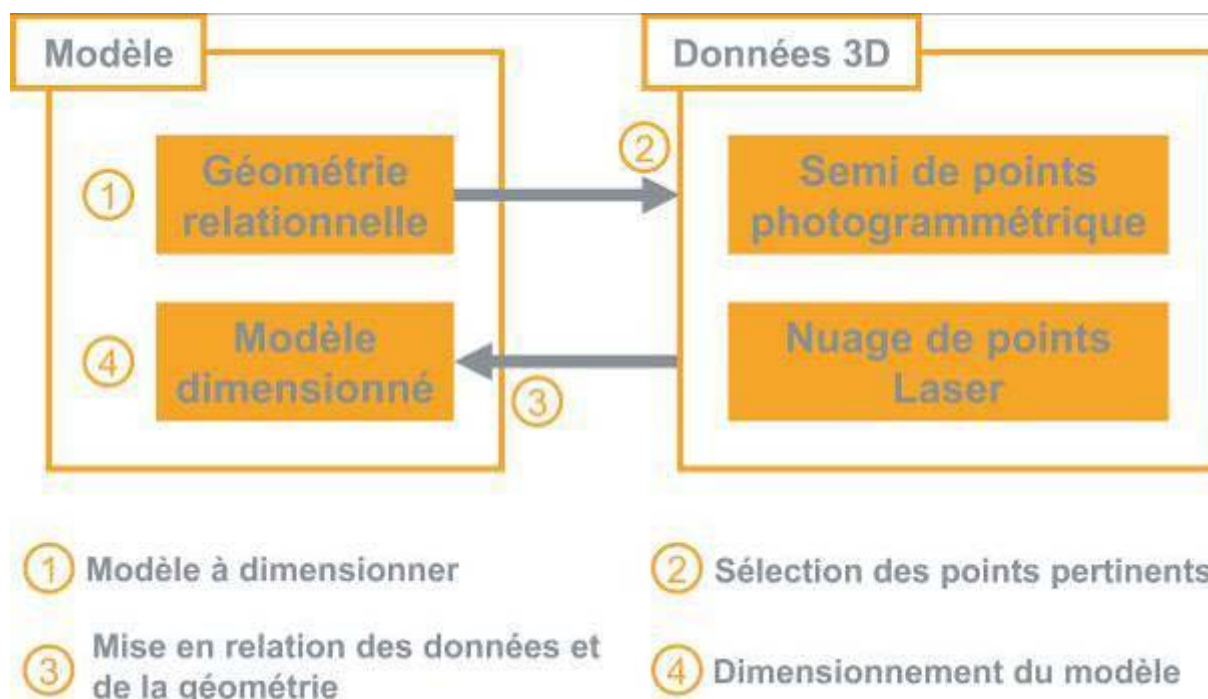


Figure 66 : interaction entre la formalisation du modèle et son dimensionnement

4.3.6. Aspect fonctionnel

Nous avons déjà exposé les trois types de modélisation, à savoir impérative, déclarative et fonctionnelle¹¹¹. La grande occurrence de logiciels de modélisation impérative nous a conduit à en choisir un pour développer notre proposition (Autocad). Les particularités que proposent la mise en forme progressive et l'introduction graduelle de complexité, sont en fait réutilisées par notre approche de modélisation par niveaux de détails successifs.

L'approche fonctionnelle est particulièrement employée par Autolisp dans AutoCAD. Son utilisation poussée permet de prendre conscience de la logique de la programmation fonctionnelle. Il n'est toutefois pas nécessaire d'utiliser un langage particulier pour mettre en place des algorithmes fonctionnels [BEA05]. Ainsi, dans VisualBasic il est possible, non seulement de trouver des procédures simples qui permettent d'exécuter des actions particulières mais également des fonctions qui renvoient des valeurs sur le même principe qu'Autolisp. La notion de processus est

¹¹¹Cf. § 3.4.1

déjà accentuée dans notre approche. La modélisation fonctionnelle est basée sur la description du moyen de fabriquer de la géométrie plus que sur la description de la géométrie. Il suffit d'utiliser une fonction particulière, avec des paramètres précis, pour obtenir un résultat spécifique. La fonction peut être exploitée pour construire d'autres éléments semblables avec des paramètres différents. Au moment de la description du contenu de la base de données, nous avons évoqué la possibilité d'enregistrer les caractéristiques de l'outil employé pour obtenir la géométrie¹¹². Il s'agit bien, dans ce cas, du principe fonctionnel. L'intérêt de cet emploi pour notre proposition, réside dans la possibilité de réutiliser le mode de création d'un objet particulier pour l'appliquer à un autre endroit du modèle, voire pour la modélisation d'un autre ouvrage, ce qui évite les répétitions d'actions semblables.

4.3.6.1. Enregistrement d'action

La notion d'enregistrement d'action est tirée du travail de recherche de Temy Tidafi¹¹³. Dans cette étude, il est question de modélisation d'action pour la figuration. Il s'agit de pouvoir représenter le modèle dans différents états, indépendamment de leur description. Le modèle est fonction de paramètres agissant sur les éléments qui le définissent : il est paramétrique. Cette démarche est intéressante car elle présente un aspect réutilisable : on modélise un objet, qui peut prendre plusieurs formes différentes à partir de sa définition initiale.

4.3.6.2. Répétitions

```
(defun proc_a() ; déclaration de la procédure
; Déclaration des variables relatives
  (setq LIG11 '(0 0.5 0))
  (setq LIG12 '(1 0.5 0))
  (setq LIG21 '(0.5 0 0))
  (setq LIG22 '(0.5 1 0))
; Exécution des fonctions de dessin
  (LIG-ARG LIG11 LIG12)
  (LIG-ARG LIG21 LIG22)
)
```

Réutiliser une partie du modèle trouve un intérêt lors de la modélisation d'objets organisés en séquences. Cette répétition est déjà prise en compte dans les modeleurs, tels que 3DSMAX, MAYA et Sketchup. Les ouvrages bâtis sont généralement composés autour de répétition d'éléments [LUC06]. La mise en

Figure 67 : procédure de dessin

¹¹² Cf. § 4.3.3

¹¹³ [TID96]

place du principe de répétition dans le processus de modélisation d'ouvrages bâtis est donc indispensable pour un modèle, mais aussi si on considère d'autres projets de modélisation. La mémorisation de la création des éléments est décisive : en enregistrant le mode de fabrication, il est possible d'obtenir un objet paramétrable. En reproduisant par la suite les actions similaires à sa création, seuls certains paramètres sont à modifier, par rapport à l'objet initial.

4.3.6.3. Expérimentations préliminaires

L'utilisation du principe fonctionnel appliqué à la modélisation d'ouvrage se situe en phase exploratoire dans le cadre de notre étude. Les éléments, qui ont été testés lors d'un stage à L'université d'aménagement de Montréal au GRCAO¹¹⁴, ne s'intègrent pas au processus dans son état actuel, mais l'ont initié. La présentation de cette expérience nous permet d'illustrer le principe qui s'applique aussi à notre proposition. Elle a été réalisée dans le logiciel AutoCAD ; le langage utilisé est Autolisp dérivé du Lisp. Celui-ci est un langage fonctionnel très ancien. Son utilisation est une formation aux principes fonctionnels. Cette expérimentation, de ce point de vue, est une initiation.

4.3.6.3.1. Essais en deux dimensions

Le principe d'expérimentation se base dans un premier temps sur une réduction du problème à un dessin en deux dimensions. L'objectif est de parvenir à composer le dessin au moyen d'entités paramétrables. Chaque fonction nécessaire au dessin, telle que ligne, rectangle, décalage, ajustement, a été intégrée de telle manière que tous les paramètres nécessaires soient récupérés : objet créé, points d'origine, point extrémité ou encore valeur de décalage.

4.3.6.3.2. Le dessin comme enregistrement

L'objectif de cette expérimentation est de rechercher un moyen d'enregistrer une séquence de dessin et de pouvoir la réutiliser en modifiant les paramètres qui ont permis sa mise en place. Cela rendra ainsi possible une adaptation à un autre contexte dimensionnel. Les fonctions sont enregistrées au fur et à mesure de leur utilisation, et consignées dans un fichier. Celui-ci contient la déclaration permettant le

¹¹⁴ GRCAO : Groupe de Recherche en Conception Assistée pas Ordinateur

chargement de la procédure. On enregistre l'action qui a permis le dessin ; cette action prend la forme d'une fonction qui est réutilisable dans un autre contexte. Les figures 68 et 69 illustrent un exemple simple de l'intérêt de l'enregistrement des actions de génération d'un dessin plus que le dessin lui-même. La représentation d'une fenêtre simple, à un niveau de détail très peu élevé, peut se faire en quatre étapes. La réutilisation du dessin ne permet pas de garder la caractéristique de décalage utilisée pendant le dessin, alors qu'elle qualifie l'objet. L'utilisation de la procédure, préférée au dessin, permet de conserver cette propriété.

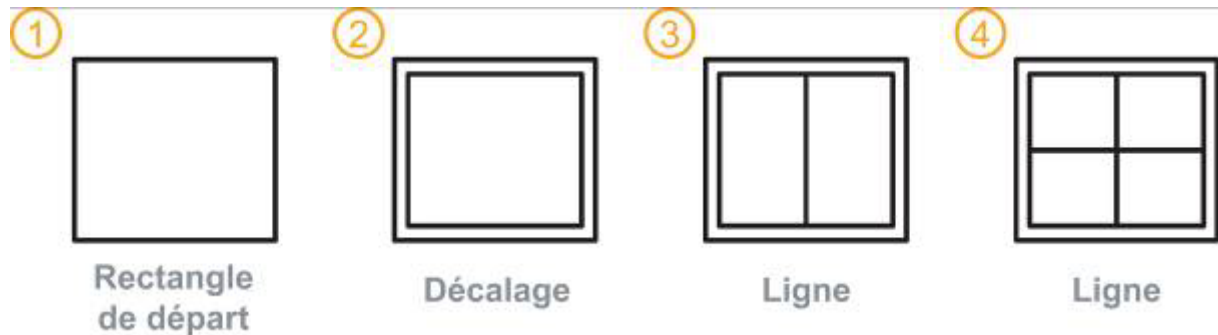


Figure 68 : décomposition des actions de dessin d'un fenêtre

4.3.6.3.3. Bibliothèque d'entités fonctionnelles

L'enregistrement automatique d'une action de dessin, si elle est organisée, constitue une bibliothèque réutilisable. Il faut différencier une bibliothèque d'objets d'une bibliothèque de procédures. Prenons l'exemple des références externes utilisées dans AutoCAD. Un dessin peut être inséré comme un élément d'un autre dessin. Il est possible de le mettre à l'échelle, de le tourner et de le déplacer. L'adaptation du dessin de référence ne dépasse pas ces opérations de base, contrairement à la réutilisation d'une procédure de dessin, qui dépend des paramètres des actions qui ont permis sa mise en forme. La procédure, réutilisée et paramétrée, permet d'obtenir un objet singulier et spécifié par les paramètres qui le constituent.

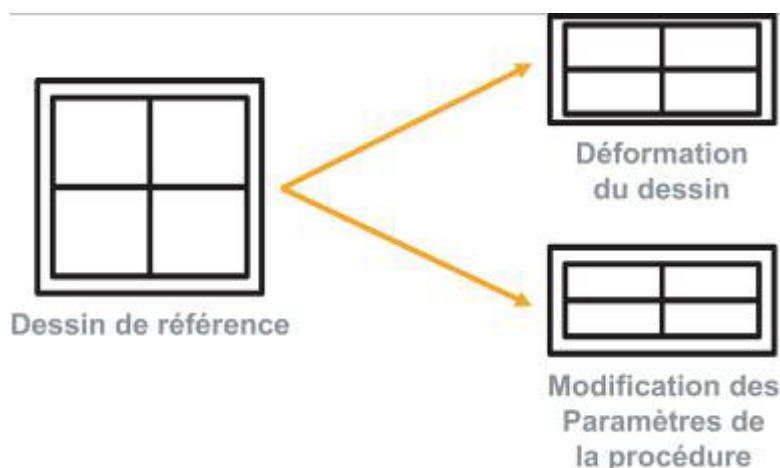


Figure 69 : exemple d'effet de la réutilisation d'un dessin et d'une procédure correspondante

4.3.6.4. Conclusion sur l'apport de l'aspect fonctionnel

L'utilisation de l'aspect fonctionnel pour l'enregistrement de dessins, en tant que succession des actions qui ont permis son élaboration, permet la réutilisation des principes de sa génération à la place de sa forme finale peu modifiable. Dans cette perspective, l'enregistrement permet la mise en place d'une bibliothèque d'actions réutilisables dans d'autres contextes. La complexité liée à l'utilisation de ce principe demeure la mise en valeur des paramètres pertinents de l'objet stocké. L'enregistrement automatique des fonctions de dessin ne permet pas de faire la distinction entre les paramètres variables par rapport à l'objet et les constantes à fixer pour ne pas dénaturer le dessin.

L'enregistrement des actions de création d'un modèle, si l'on replace cette expérimentation dans le contexte de l'étude, est intéressant du point de vue de l'historique du modèle. Ainsi, si l'on enregistre les paramètres et la fonction de création de chaque objet et que les objets ont des dépendances hiérarchiques, on peut reconstruire l'historique des objets et ce jusqu'à l'origine du modèle. L'organisation des faces géométriques que nous proposons, se plie à cette utilisation possible des principes fonctionnels.

4.4. Outils spécifiques aux étapes

Nous avons décrit les étapes du processus de modélisation issues de notre analyse de la formalisation d'un ouvrage pendant sa conception¹¹⁵. Il s'agit dès lors d'y associer des outils qui permettent de guider la modélisation et d'y intégrer des connaissances architecturales. Ceux-ci sont spécifiques et leur implémentation permet d'en maîtriser les paramètres pour l'enregistrement d'actions.

4.4.1. Forme de base

Comme nous l'avons déjà évoqué¹¹⁶, cette première étape doit permettre d'importer une géométrie externe, si elle existe, ou d'utiliser les outils de modélisation impérative pour construire la forme de base. Une fois construite, on l'enregistre dans un répertoire, dans lequel d'autres formes de base ont déjà été mémorisées. La mise à disposition d'un ensemble de géométries les plus simples, permet à terme de constituer une bibliothèque regroupant les formes de base possibles, dans laquelle on sélectionnera celle qui correspond à l'ouvrage. L'esprit de regroupement exhaustif n'est possible qu'à cette phase où, malgré l'infinité de solutions possibles, le nombre de forme est relativement vite limité, étant donné les contraintes que l'on impose à la première phase.

4.4.1.1. Nomenclature des façades

Une fois que la géométrie est mise en place, on procède à une appropriation des faces. Pour cette première étape, puisqu'on laisse la possibilité d'export, la géométrie complète est soumise à l'enregistrement dans la base toute entière. Dès lors, on commence par la valider. La première fonction consiste donc à attribuer un nom à chacune des faces correspondant à une façade de l'ouvrage. À la fin de cette première étape, les faces sont intégrées à la base comme partie intégrante du premier niveau de détail.

4.4.1.2. Positionnement et échelle

Chaque face, pour ce niveau de détail, correspond à une façade. Nous devons donc associer une face par plan de référence. Cette association correspond à la mise à

¹¹⁵ Cf. § 4.1.4

¹¹⁶ Cf. § 4.2.2.3.2

l'échelle et à l'orientation de la géométrie, car c'est la première introduction de données dimensionnelles au processus de modélisation. Cette étape fait référence aux outils de mise à l'échelle du logiciel Photomodeler¹¹⁷.

Une fois la première étape terminée, le modèle est complet et chaque façade principale est définie.

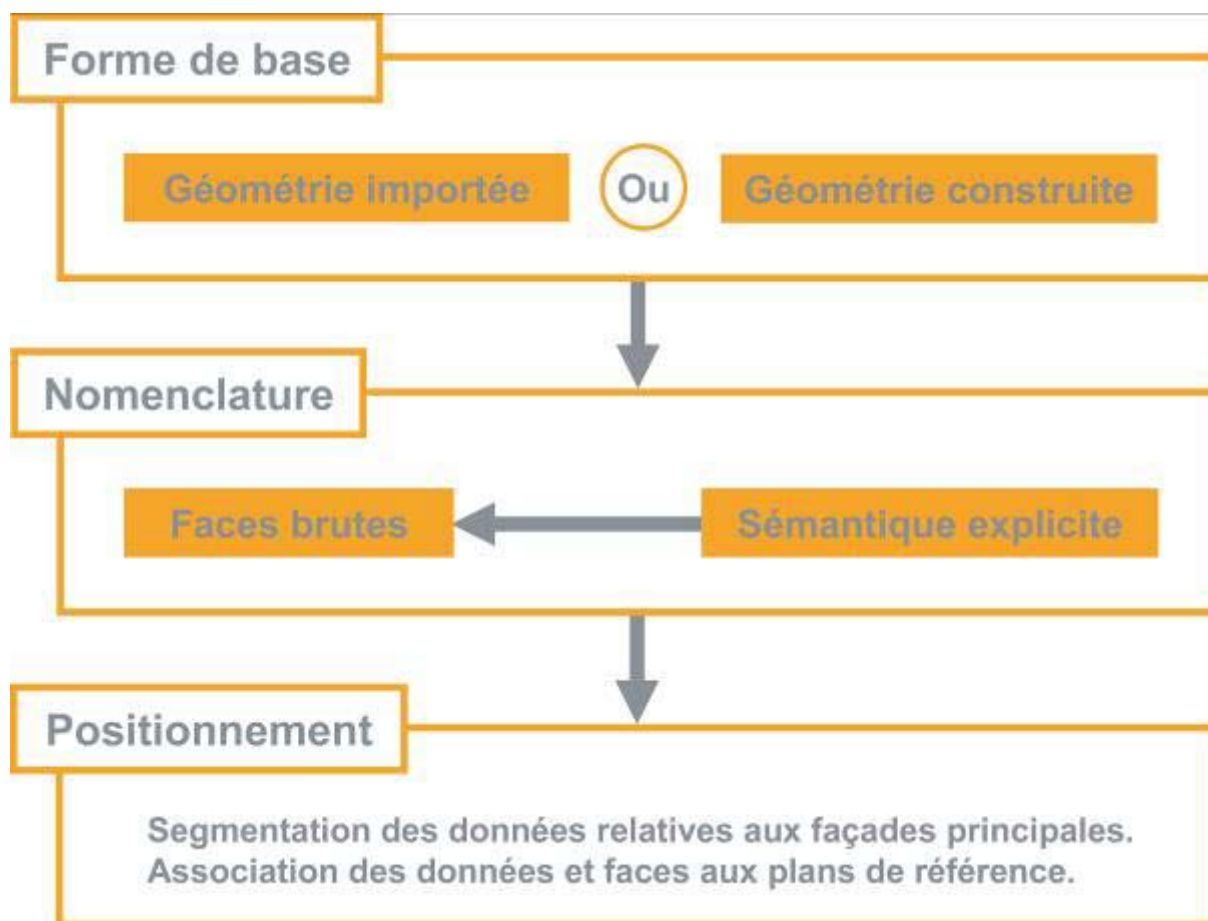


Figure 70 : schématisation de la première étape du processus

4.4.2. Divisions du volume

Nous avons déjà fait état des relations hiérarchiques entre les faces d'une étape et celles de l'étape précédente¹¹⁸. Ainsi, la seconde étape se base sur la géométrie mise en place dans la première.

¹¹⁷ Les positions de prise de vue sont reconstituées entre elles dans un premier temps. Aucune dimension n'est encore utilisée à ce moment. C'est seulement au moment où l'on définit une distance et une orientation, que le modèle permet de récupérer des données dimensionnelles. La mise à l'échelle et l'orientation peuvent être réalisées simultanément par l'importation de points de calage mesurés sur l'ouvrage.

4.4.2.1. Divisions verticales et horizontales

Pour instaurer les divisions de façade, chaque face de la première étape est traitée séparément. Il est possible de faire la différence entre divisions horizontale et verticale au moment du dimensionnement. En revanche, la division en deux d'une face correspond à une opération de modification de la géométrie. La face originale produit deux faces filles.

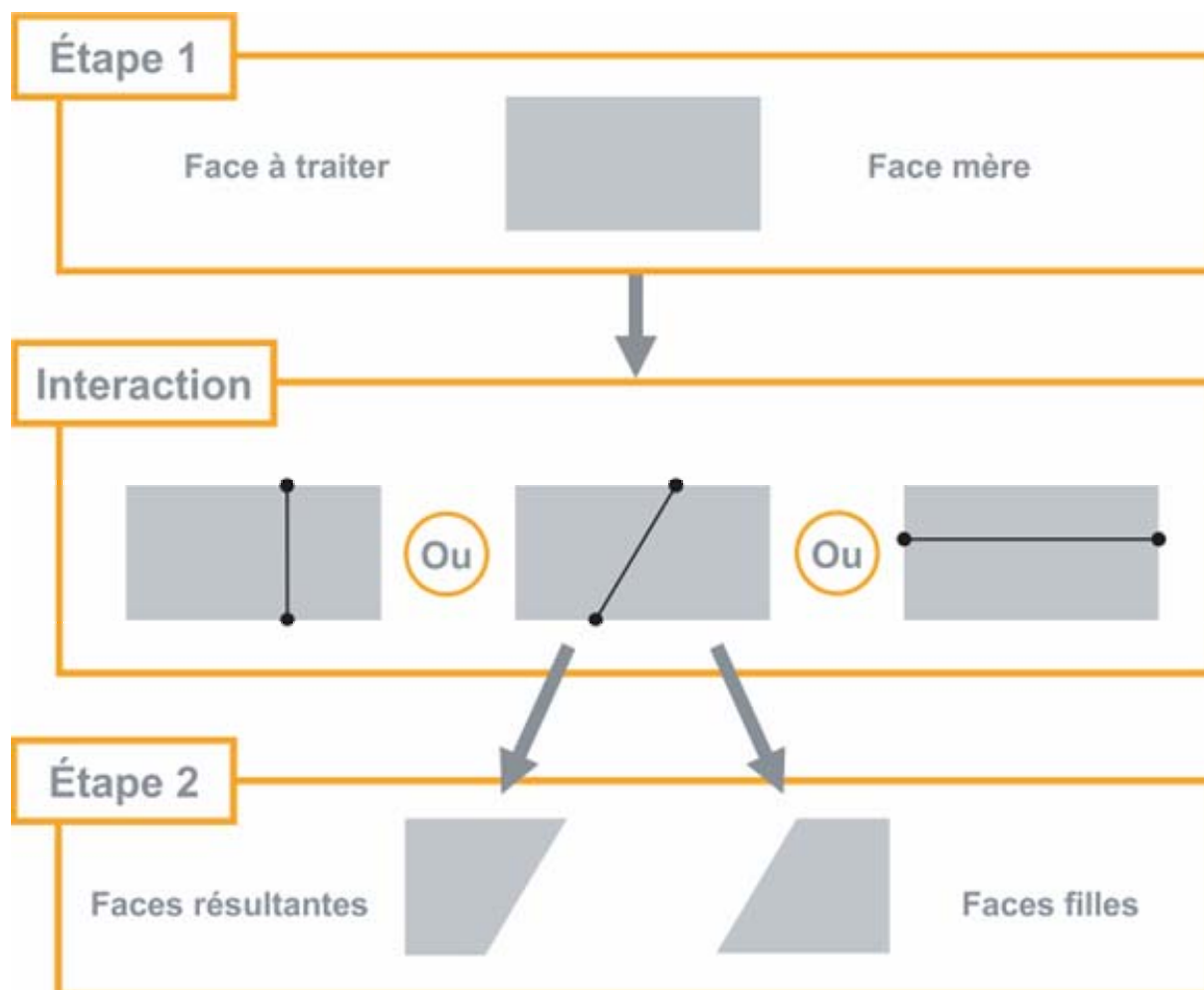


Figure 71 : division de face et hiérarchie

4.4.2.2. Considérations hiérarchiques et redondance

La complexification de la géométrie, introduite au fur et à mesure des étapes de définition des niveaux de détail, est source de redondance. Une face qui a une descendance génère ainsi de la redondance. Il faut choisir quant à l'existence de ces faces « obsolètes ». Du point de vue du modèle, dont la définition s'améliore tout au

¹¹⁸ Cf. § 3.3.1.2

long des étapes, les faces parentes ne présentent qu'un intérêt mineur, puisqu'il existe des faces plus précises qui définissent la même zone. Or elles représentent chacune une étape donnée. La conservation des faces du niveau précédent est primordiale pour deux raisons : elles sont le témoin d'un niveau de détail donné et cohérent, d'une part, et elles permettent de conserver une homogénéité du modèle durant la définition d'une étape, d'autre part. Ainsi, toute face n'ayant pas encore de filiation est significative de la définition à finaliser. De plus, les faces ayant une descendance correspondent à un nœud dans l'arbre hiérarchique qui compose le modèle et qui conserve, par ce biais, toute sa cohérence.

4.4.2.3. Décrochements

Une fois les faces parentes divisées, on intègre les avancées et renforcements des faces créées en fonction de l'ouvrage. Cet outil se nourrit d'une fonctionnalité du logiciel Sketchup. Les croquis sont élaborés à partir de formes simples que l'on enrichit, notamment par l'extrusion des faces. Un décrochement de façade correspond à l'extrusion d'une face perpendiculairement au plan de la façade.

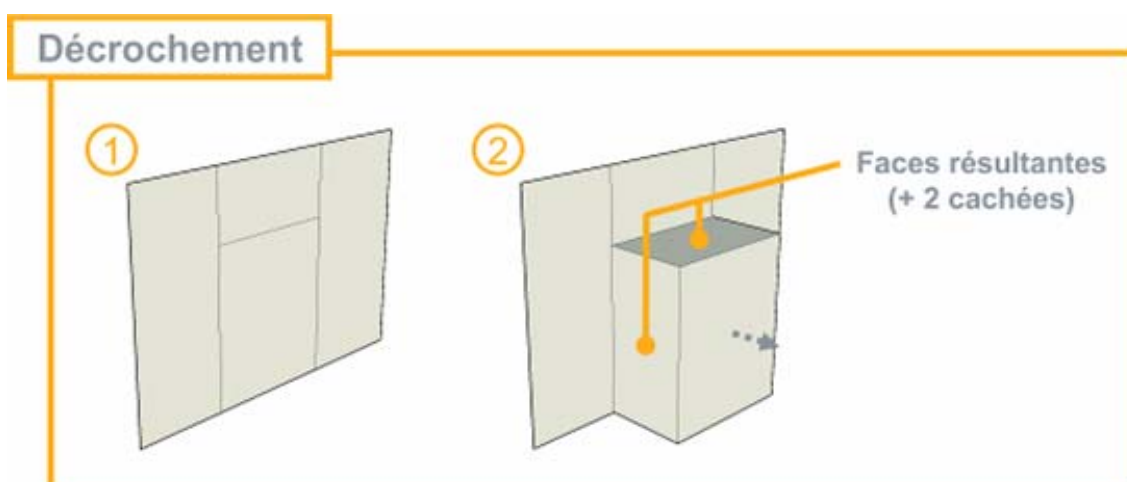


Figure 72 : décrochement d'une face par rapport à d'autres

4.4.2.4. Dimensionnement

À partir de cette étape, on introduit le fait que le dimensionnement d'une face est optionnel. Il est possible qu'une face créée pendant une étape, garde les propriétés

de dimensionnement de sa parente. Dans ce cas, elle hérite de l'association au plan de référence définie dans l'étape précédente¹¹⁹.

Les faces qui se différencient de leur hiérarchie doivent en revanche être dimensionnées. C'est à ce moment là que la mise en place de la notion de lieux géométriques prend son sens. Si l'on prend comme exemple le décrochement, l'extrusion d'une face provoque la création de faces latérales qui décrivent le chemin suivi par les arêtes de la face principale. Ces faces latérales sont adjacentes entre elles, d'une part, mais aussi avec la face extrudée, et également avec les faces voisines initialement de la face principale. L'association de ces faces latérales à leurs plans de référence respectifs détermine la forme de la face extrudée, qui est également associée à son plan pour qualifier la valeur du décrochement.

On constate ici que la simple association d'un plan de référence à chacune des faces permet leur définition dimensionnelle, et ce, grâce aux relations d'adjacence induites par les lieux géométriques.

4.4.3. Insertions

Comme pour l'étape précédente, on hérite de la géométrie qui est enrichie des principes de cette étape d'insertion. Celle-ci permet de définir les éléments, tels que les baies et les dispositifs monumentaux. La notion de baie déjà évoquée¹²⁰ doit être analysée en détail.

4.4.3.1. Baies

Une baie correspond à un trou dans un mur et plus précisément à :

« Toute ouverture pratiquée dans un mur ou dans une toiture, ayant pour objet le passage ou l'éclairage des locaux

Une baie est encadrée par :

- en bas, un seuil (porte), ou un appui (fenêtre) couronnant une allège;*
- en haut, un linteau, une plate-bande ou un arc, dont la face inférieure est la voussure (linteau), ou l'intrados (arc) ;*

¹¹⁹ Cf. §4.4.1.2

¹²⁰ Cf. §4.1.4.3.1

- sur les côtés : à l'extérieur, par des tableaux, faces de retour des jambages, montants ou piédroits ; à l'intérieur, par des ébrasements. »¹²¹

Plusieurs baies sont séparées par des trumeaux :

« **Trumeau** : Pan de mur entre deux embrasures au même niveau. Ne pas appeler trumeau le pilier central qui sépare deux baies jumelées ou divise une porte à deux vantaux. Dans les trumeaux contre lesquels est adossé ou engagé une colonne ou un pilastre, l'alette est la partie de la face du trumeau comprise entre la colonne ou le pilastre et l'embrasure. »

Le calage sépare l'angle d'un mur avec une baie :

« **Calage** : Pan de mur compris entre une embrasure et un ressaut vertical ou un angle du bâtiment. »¹²²

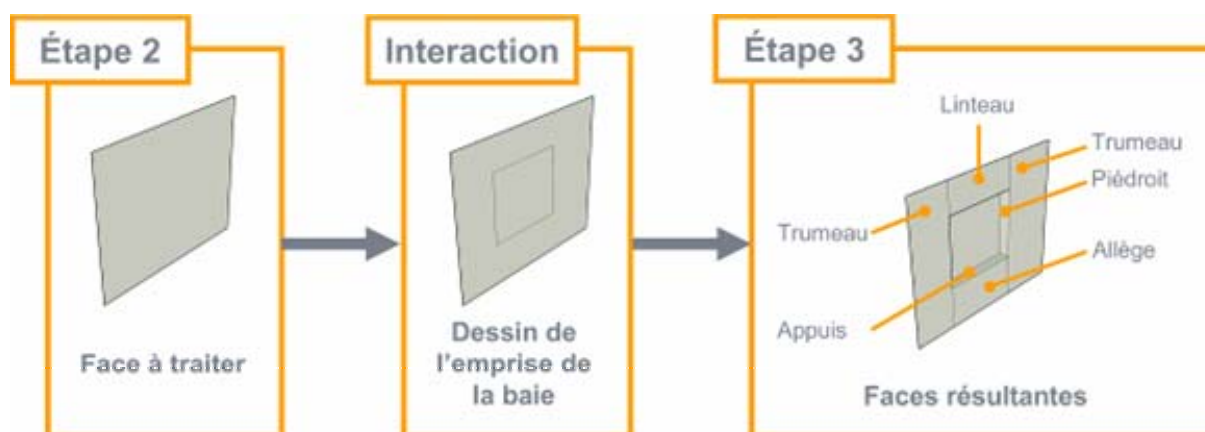


Figure 73 : procédure d'insertion d'une baie dans une face provenant de la deuxième étape

Le point de départ à l'insertion d'une baie est la face parente. Le résultat de la modification doit correspondre à la baie dont le *Dicobat* nous donne tous les éléments qui y sont relatifs. Les principes d'analyse scientifique permettent de compléter cette notion de baie en introduisant la relation entre cette dernière et le mur qui la reçoit. Ces descriptions provenant de la documentation sont suffisantes pour la mise en place de l'outil. A la fin de l'opération, l'insertion créera deux trumeaux (ou calages, si c'est près d'un angle), un seuil (ou une allège, si c'est une fenêtre), un linteau et deux piédroits¹²³. La définition de l'ouverture détermine toutes les faces qui l'entourent. Pour une plus grande cohérence du modèle, la baie est symbolisée par une face, qui figure, par exemple, la menuiserie. L'insertion d'une

¹²¹ [VIG92]

¹²² [PER93]

¹²³ Cf. Figure 32

baie introduit une modification importante de la géométrie, mais l'intervention de l'utilisateur n'est pas compliquée en proportion du résultat : l'insertion d'une diagonale à l'emplacement de la baie, semblable à celle d'un rectangle, suffit à la mise en place de la baie.

4.4.3.2. Dispositifs monumentaux

La gestion des dispositifs monumentaux, tels que des colonnes, est une intervention difficile à gérer. Ces éléments sont mentionnés à cette étape parce que leur échelle est importante comparée aux dimensions de l'ouvrage. Cependant le traitement de tels éléments relève plus de la gestion de détail ; c'est en raison de leur importance dimensionnelle et de l'influence sur la forme finale de l'ouvrage qu'il faut mettre ces objets en place le plus tôt possible. La description des dispositifs est similaire aux détails déjà traités¹²⁴.

4.4.3.3. Positionnement

Les éléments monumentaux étant exposés avec les détails, la description de cette phase de dimensionnement ne traite que des baies. Celles-ci sont à mettre en parallèle avec les décrochements. En effet, elles correspondent à la création d'éléments latéraux. A l'instar des décrochements, les éléments adjacents permettent le dimensionnement de la baie associé à la qualification de sa profondeur. Les baies ont une caractéristique de répétitivité qu'il faut prendre en compte¹²⁵. Par conséquent, il est nécessaire de percevoir la récupération de la valeur de la trame qui constitue chaque groupe de baie. Cette simplification par la copie n'est possible qu'après vérification de la similitude des éléments.

4.4.4. Mise en relations

L'étape de mise en relation est représentative de l'aspect matériel de l'ouvrage. En effet, dans les trois phases précédentes, nous avons décrit l'ouvrage en considérant uniquement l'aspect formel. Le niveau de détail allant croissant tout au long du processus de modélisation, cette étape traite d'un niveau de détail où les matériaux influent sur la configuration à mettre en place. Si on prend l'exemple des baies, qui ont été insérées au cours de l'étape précédente, l'interaction entre les éléments

¹²⁴ Cf. §4.1.4.5

¹²⁵ Cf. §4.1.4.3.1

constitutifs de la fenêtre et le mur de façade nous ont permis de mettre en place les faces créées par l'insertion. Si on accentue, dans le détail, l'analyse de cette fenêtre, on peut ainsi prendre en compte les manifestations formelles autres que le percement de la baie. En outre, celle-ci constitue une fragilisation de la façade, c'est pourquoi elle est renforcée pour permettre une transmission des efforts d'une autre façon. Le linteau ou l'arc, placé au dessus, reporte les charges sur les piédroits disposés latéralement. Cet aspect structurel est très souvent visible¹²⁶, permettant ainsi la mise en forme cette étape. Ce qui était dénommé « discontinuité »¹²⁷ ne fait pas l'objet d'outil spécifique en temps que « non traitement » des transitions.

4.4.4.1. Transition et préparation

L'étape de transition et de préparation des détails ne se traite pas de la même façon, si elle est suivie par la définition des détails ou si elle représente le niveau de précision visé pour le modèle géométrique. Par conséquent, elle est soit une étape intermédiaire de mise en place, soit une étape de finition. La formalisation est donc très différente dans les deux cas. Cela s'explique par la particularité des éléments de détail. On a vu qu'ils sont de nature très différente¹²⁸ : ils ne sont donc pas traités de la même façon, ce qui impose une certaine polyvalence et une robustesse lors de leur mise en place. De même, elle n'est pas formalisée en fonction du traitement ou non des détails. L'influence de cette différenciation entre l'aspect transitoire ou de finition correspond à l'utilisation d'un outil supplémentaire pour la finition : l'outil de transition/préparation est utilisé dans les deux cas. Il permet la définition de zones sur une géométrie définie. C'est un outil de dessin assimilable à celui utilisé pour la division de face¹²⁹.

4.4.5. Détail

Le traitement des détails est une étude à part entière. Comme nous l'avons introduit¹³⁰, il peut être considéré sous deux aspects : le détail décomposable et le détail sculptural. De par la complexité du traitement des détails, nous ne les avons pas traités comme des éléments intégrés à notre processus. Néanmoins, si l'on

¹²⁶ Cf. Figures 6 et 32

¹²⁷ Cf. §4.1.4.4.2

¹²⁸ Cf. §4.1.4.5

¹²⁹ Cf. §4.4.2

considère les détails décomposables, leur intégration est imaginable. À présent, examinons trois études abordant le traitement de ces éléments.

4.4.5.1. Chapiteau corinthien

Cette étude vise à construire un chapiteau corinthien au moyen d'une approche orientée objet [BRA97]. Le chapiteau corinthien est composé d'éléments tels que des feuilles d'acanthé, de feuille d'oliviers, de volutes. Ces éléments sont eux même sculpturaux mais leur forme générale assemblée donne un bon aperçu du chapiteau.

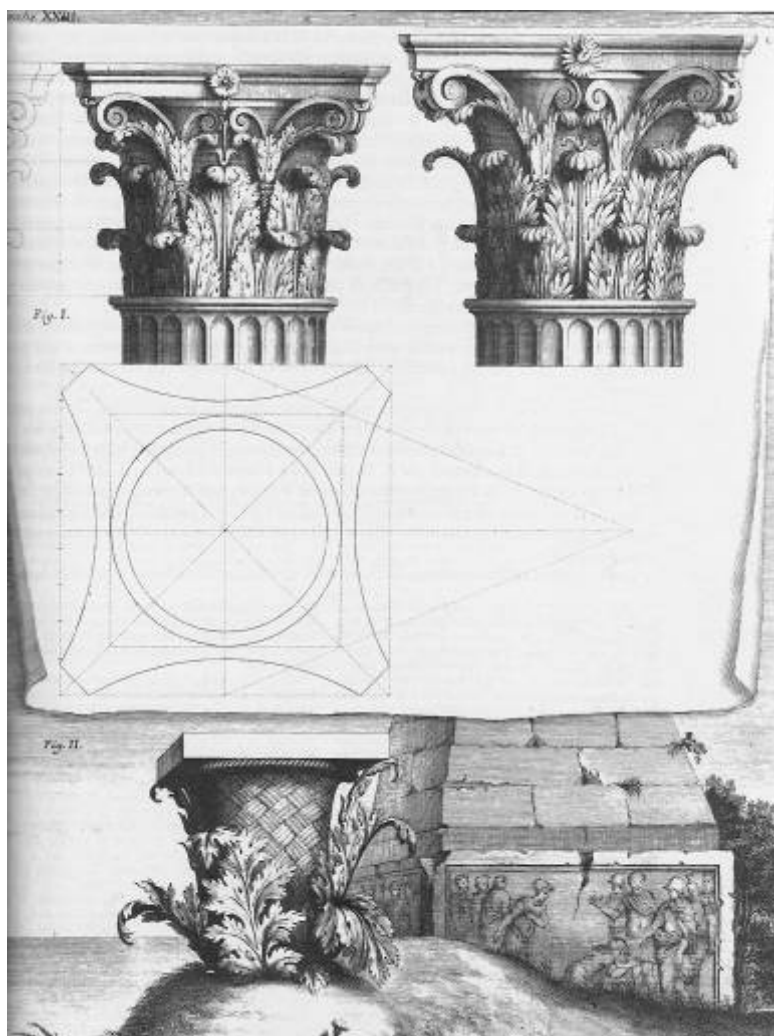


Figure 74 : chapiteau corinthien Planche réalisée d'après les descriptions de Vitruve [VIT96].

Les éléments sont modélisés séparément et assemblés par la suite pour aboutir au modèle du chapiteau. L'objectif de ce travail est de permettre la formalisation de connaissances théoriques ainsi que l'exploitation de mesures photogrammétriques.

¹³⁰ Cf. § 4.1.4.5

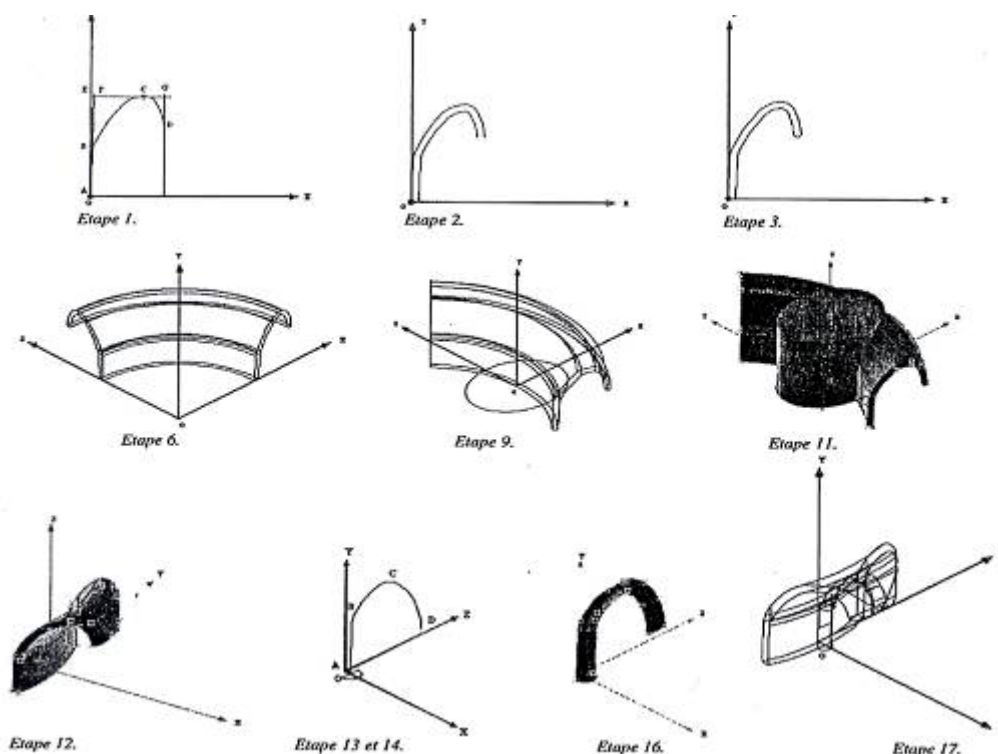


Figure 75 : construction des sous éléments du modèle

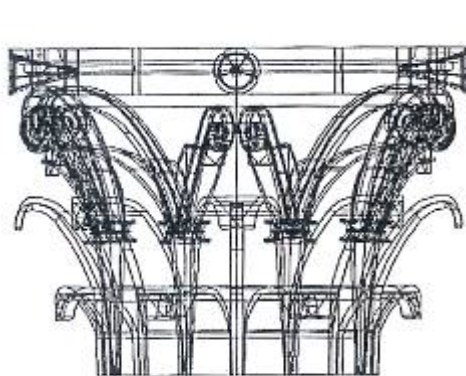


Figure 45. Assemblage des différents composants.

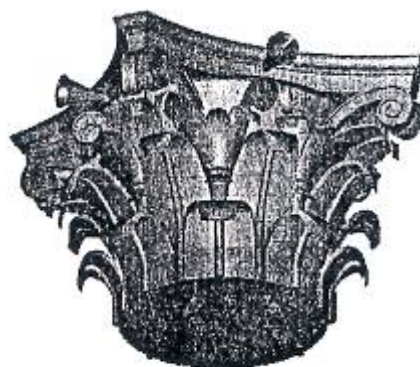


Figure 46. Rendu du modèle décrit par défaut.

Figure 76 : le modèle final après assemblage

4.4.5.2. Entablement composite

La modélisation d'un entablement¹³¹ composite relève de l'association d'un empilement de moulure et d'un réseau d'éléments répétés [BEG03].

¹³¹ « Saillie qui est au sommet des murs d'un bâtiment et qui supporte la charpente de la toiture » [ROB01]

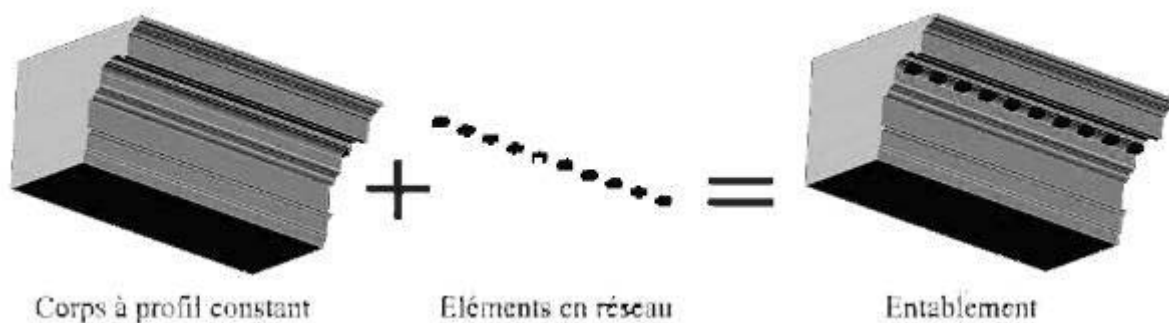


Figure 77 : association de moulures et de répétitions



Figure 78 : entablement modélisé

Cette étude propose des outils de modélisation de moulures spécifiques de style classiques basés sur les traités architecturaux les plus pertinents (Palladio, Scamozzi, Serlio et Vignole)¹³².

4.4.5.3. Colonnnettes khmères

La modélisation de colonnettes khmères [KAD04] est un exemple complémentaire, même si le style architectural traité est différent. Cette étude fait suite à celle de Reda Begrich¹³³ et reprend les mêmes principes de modélisation en les adaptant aux particularités de l'architecture du site d'Angkor au Cambodge où est édifié un grand nombre de temples sur une superficie de 230km² [CUN04].

¹³² [BEG03]

¹³³ [BEG03]

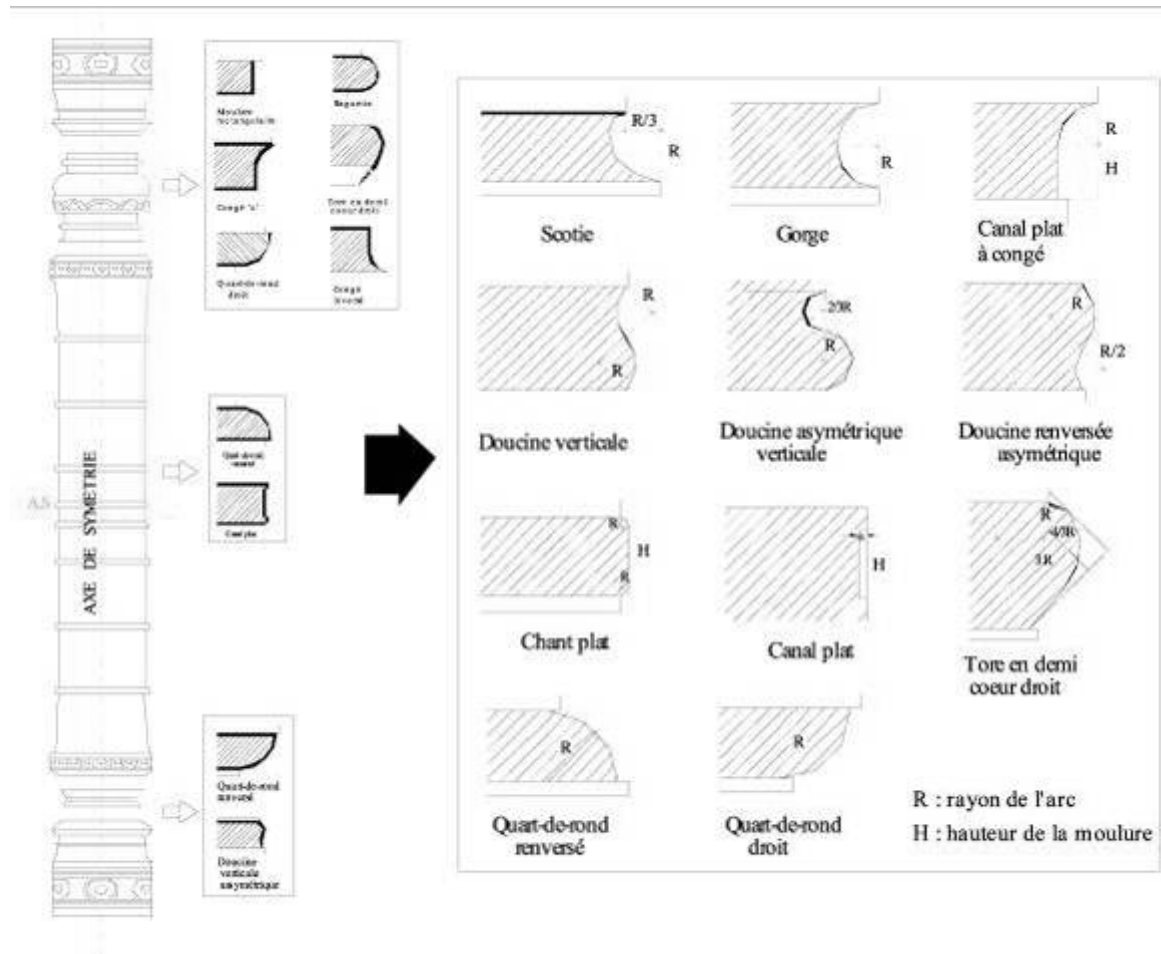


Figure 79 : outils de composition d'une colonnette khmère

4.5. Conclusion sur la proposition de modélisation d'ouvrage

Les propos précédemment tenus nous ont permis d'exposer le fond du travail réalisé pendant cette étude. La modélisation d'un ouvrage bâti à l'aide de données dimensionnelles est une démarche difficile, due en grande partie à la complexité intrinsèque de l'ouvrage. C'est en se penchant sur cette complexité que l'analogie entre la conception et la modélisation de l'ouvrage est apparue comme une possibilité pour gérer ce processus long et complexe. La conception correspond à une complexification progressive du projet jusqu'à la définition complète de l'ouvrage. Elle peut être divisée en plusieurs étapes identifiables. L'adaptation et la traduction vers le relevé nous permettent de définir cinq étapes de modélisation. À cette méthode analogique s'ajoute le principe de modèle relationnel précédant l'intégration des données. Il permet une définition la plus complète possible du modèle, indépendamment du manque de données, qui peut subsister. Le modèle préexistant offre la possibilité de sélectionner des données pertinentes pour mettre les éléments du modèle à l'échelle. La modélisation d'un ouvrage investit une grande quantité de connaissances architecturales. Celles-ci ne sont pas facilement accessibles, c'est pourquoi, si l'on veut les rendre utilisables, elles doivent être intégrées au processus. La mise en place de fonctions particulières aux ouvrages est, pour nous, un moyen efficace d'y parvenir. Toutes les informations nécessaires à la modélisation, sont stockées dans une base de données, qui regroupe ainsi tout dans un même fichier. La méthode, ainsi créée et partiellement testée, ouvre des perspectives quant à la gestion de la modélisation d'ouvrage, comme nous allons l'aborder.

5. Cinquième Partie : synthèse et prospections

La dernière partie permet de prendre du recul par rapport au travail effectué et ainsi de préparer la conclusion générale en considérant la réponse apportée au sujet et en insistant sur l'intérêt de notre point de vue. La synthèse doit aussi porter sur ce qu'il reste à faire dans l'élan du processus mis en place. La réflexion quant à la combinaison de techniques d'acquisition a généré un processus de traitement de la modélisation à base de données dimensionnelles dont on envisage encore des évolutions possibles.

5.	Cinquième Partie : synthèse et prospections _____	217
5.1.	Combinaisons _____	219
5.1.1.	Regroupement des techniques d'acquisition _____	219
5.1.1.1.	Utilisation ciblée du Laser _____	219
5.1.1.1.1.	Volume des données _____	219
5.1.1.1.2.	Anticipation _____	220
5.1.1.1.3.	Précaution _____	220
5.1.1.2.	L'image comme lien _____	221
5.1.1.2.1.	Intégration de l'image dans les données laser _____	221
5.1.1.2.2.	Photo-interprétation _____	223
5.1.1.3.	Complémentarité entre photogrammétrie et laser _____	223
5.1.1.3.1.	Relevé semblable _____	223
5.1.1.3.2.	Systématicité et pertinence _____	224
5.1.1.4.	Manque de données _____	225
5.1.2.	La modélisation guidée par les connaissances architecturales _____	226
5.1.2.1.	Deux problèmes croisés _____	226
5.1.2.1.1.	Complexité de la forme architecturale _____	227
5.1.2.1.2.	Multitude de données à organiser _____	228
5.1.2.2.	Formalisation progressive du modèle _____	228
5.1.2.2.1.	Processus par étape _____	228
5.1.2.2.2.	Réduction progressive des données _____	229
5.1.2.3.	Bâtiment existant / Connaissances existantes _____	229
5.1.2.3.1.	Validation du modèle par la sémantique _____	229
5.1.2.3.2.	Validation des hypothèses de modélisation _____	230
5.2.	Prospections _____	231
5.2.1.	implémentation d'outils _____	231
5.2.1.1.	Intégration de l'aspect fonctionnel _____	231
5.2.1.1.1.	Association avec la structure hiérarchique _____	231
5.2.1.1.2.	Enregistrement d'actions / Répétitions _____	232
5.2.1.1.3.	Historique _____	233
5.2.1.1.4.	Bibliothèque de procédures _____	233
5.2.1.2.	Outils d'analyse _____	234
5.2.1.2.1.	Maîtriser l'évolution du modèle _____	235
5.2.1.2.2.	Liens entre données et faces modélisées _____	235
5.2.1.2.3.	Connaître la précision _____	235
5.2.2.	Possibilité de création d'outil pour l'utilisateur _____	236
5.2.2.1.	Analyse _____	237
5.2.2.2.	Intégrer les acquis de l'utilisateur _____	237
5.2.2.2.1.	Enregistrement du savoir faire _____	237
5.2.2.2.2.	Réutilisation durable _____	237
5.3.	Conclusion _____	239

5.1. Combinaisons

La combinaison des techniques d'acquisition est envisageable de deux façons différentes et complémentaires : d'un point de vue technologique, d'une part, et d'un point de vue téléologique, d'autre part. L'aspect technologique donne les potentiels des outils devant être utilisés pour le même relevé et la considération téléologique considère les données en tant que telles et évalue leur exploitation combinée.

5.1.1. Regroupement des techniques d'acquisition

Nous considérons ici la photogrammétrie et le balayage optique comme source de données utilisables pour la modélisation architecturale. La combinaison de ces deux techniques doit être considérée par rapport aux compatibilités des systèmes et des processus et aux efforts à mettre en œuvre pour qu'elle soit réalisée le mieux possible.

5.1.1.1. Utilisation ciblée du Laser

Nous avons exposé¹³⁴ le principe de fonctionnement de l'acquisition Laser en soulignant les aspects de cette technique qui alourdissent le relevé. Que peut apporter la combinaison avec la photogrammétrie pour réduire cette lourdeur ?

5.1.1.1.1. Volume des données

Le volume des données après l'acquisition est un aspect qui dépend exclusivement des choix de l'opérateur. Il décide des paramètres de l'acquisition. Il faut analyser les raisons pour lesquelles on obtient des jeux de données si importants.

Tout d'abord, le grand nombre de points est dû à la précision des appareils d'acquisition ce qui entraîne donc une augmentation de la quantité de points levés pour une même surface couverte. Si le pas de saisie est doublé, la quantité de données est proportionnelle au carré du facteur, donc ici quatre fois plus importante. L'évolution des outils de sélection des zones d'acquisition va dans ce sens. Elles sont passées d'un simple rectangle de sélection (Mensi Soisic) à la possibilité de décrire un polygone (Trimble GX avec Pointscape). La précision de la

¹³⁴ Cf. §2.4.3.1

sélection est augmentée, les points non désirés sont ainsi moins nombreux, limitant de ce fait l'augmentation inutile de la taille des données.

5.1.1.1.2. Anticipation

Cette quantité de données pose un problème de gestion par la suite. Les données doivent, en effet, être segmentées, organisées afin d'être utilisées au mieux.

La perception que l'on a de l'ouvrage au moment d'acquérir les données n'est pas la plus pertinente. L'ouvrage n'est pas analysé en tant que tel mais comme objet dont il ne faut pas oublier le moindre détail. L'analyse se base sur les possibilités de stations et de recouvrement des données.

Les évolutions matérielles de la photogrammétrie, poussées par le développement des appareils photographiques destinés au grand public, lui donnent une souplesse incomparable sur le terrain. De plus, les images recueillies ont un très grand potentiel d'information grâce à leur fidélité par rapport à l'objet qu'elles enregistrent.

Le premier aspect de la combinaison qui nous intéresse se tient donc au moment de l'acquisition de données. La masse des données laser peut être réduite par la sélection de zones à densité variable au moment de la saisie. Ces zones devant être connues au moment de l'acquisition, l'anticipation est donc indispensable. La nature des données photogrammétriques convient très bien à la phase d'analyse préalable nécessaire au choix des zones de densité variable du laser. On peut donc préconiser un décalage temporel entre acquisition photogrammétrique et laser. Un temps d'analyse des images permet de mettre en place la liste des zones de forte densité, indispensable à la modélisation de détails ainsi que celle de faible densité où les éléments ne nécessitent que peu de données.

5.1.1.1.3. Précaution

L'anticipation de l'acquisition photogrammétrique sur le balayage laser se justifie par l'économie de données inutiles en fixant une densité élevée de points à de grandes zones d'acquisition. Il faut noter que l'économie de points ne doit pas être faite au détriment du temps passé sur le terrain. En effet, les interactions que nécessitent les phases de saisie des paramètres d'acquisition influent sur un facteur important qui est la durée de la mission d'acquisition sur le terrain. Néanmoins, la prévision des

zones de densité variable est aussi un moyen d'éviter les erreurs d'appréciation fréquentes causées par la découverte de l'objet à relever au moment de l'acquisition. L'acquisition des points à la densité maximale peut être perçue aussi comme une précaution de l'opérateur en prévision de besoins imprévus rencontrés lors de la modélisation ultérieure. On assiste ici à une contradiction qui réside dans l'anticipation des manques de précision éventuels, qui pousse à une surévaluation du volume de données. Si le temps d'acquisition est mis en valeur, il s'oppose une fois de plus à l'anticipation proposée de la photogrammétrie sur l'acquisition laser : le temps de saisie des données laser laisse le temps pour les prises de vues photogrammétriques. Finalement, la combinaison des techniques impose un choix qui porte sur le temps que l'on veut économiser, que ce soit sur le terrain ou en laboratoire. La méthode à choisir pour effectuer un tel relevé peut s'inspirer des 3x3 Règles [WAL94] qui énoncent notamment la nécessité d'organisation rigoureuse de l'acquisition.

5.1.1.2. L'image comme lien

La première interaction entre les deux techniques qui se tient au moment de l'acquisition des données a été évoquée précédemment. Il s'agit maintenant de voir comment les données brutes produites par l'acquisition peuvent être utilisées conjointement et de façon complémentaire.

5.1.1.2.1. Intégration de l'image dans les données laser

La combinaison du point de vue de l'usage des données se place ici au niveau de l'intégration de l'image dans le processus de traitement des données laser. Les systèmes laser prennent en compte la donnée image dans leur conception même. Un capteur vidéo est intégré dans la plupart des scanners. Elle permet de faciliter l'interface avec l'utilisateur. Il peut choisir plus facilement les zones d'acquisition sur un panorama de la zone de saisie possible. Les images produites peuvent être enregistrées pour servir dans les phases de post-traitement. Mais les capteurs vidéo sont de qualité et de résolution plus faibles qu'un capteur d'appareil numérique haut de gamme. C'est pourquoi certains dispositifs comme ceux de la marque Riegl [RIE06] donnent la possibilité de fixer un appareil de prise de vue traditionnel sur le châssis de leur scanner. Pour chaque point de vue laser correspond donc une ou

plusieurs prise de vue photographique. L'intégration de l'image dans l'acquisition laser n'est donc pas inédite. Mais dans ce cas, le dispositif d'image est lié à la station de prise de vue du scanner. La combinaison, que nous entendons aborder ici, est à



Figure 80 : scanner LMS-Z420i de RIEGL

faire entre les images issues des prises de vue photogrammétriques et les données laser. La différence est assez importante car les points de vue sont distincts. Les deux techniques sont basées sur le changement des points de vue pour une acquisition la plus complète possible, mais ces schémas sont distincts, par différents aspects. En photogrammétrie, la nécessité impliquant que chaque point à mesurer soit visible sur au moins trois images¹³⁵ impose un plus grand nombre de prises de vue qu'en laser. De plus, l'ouverture des systèmes laser est plus grande que les grands angles en photographie. La maniabilité des appareils photographiques facilite cette contrainte de multitude des points de vue. En effet, des prises de vue peuvent être réalisées depuis des points de vue où un trépied ne peut être installé, tels qu'une fenêtre en hauteur d'un bâtiment voisin ou simplement une échelle. La

nécessité de stations longues imposée par le laser ne se rencontre pas avec la photogrammétrie. Les images issues des prises de vue photogrammétriques apportent donc, non pas nécessairement le moyen d'obtenir des points manquants, mais surtout des aperçus selon des angles différents des stations effectuées avec le dispositif laser.

¹³⁵ La théorie permet le calcul d'un point à partir de deux images ; la troisième permet d'estimer l'erreur de mesure.

5.1.1.2.2. Photo-interprétation

L'apport de l'image au nuage de points est double. D'abord, l'information colorimétrique ajoute une lisibilité importante à la multitude de points du nuage, puis l'information de lisibilité de l'image aide à la compréhension de l'ouvrage bâti. Les images photogrammétriques ont une résolution plus grande pour deux raisons : les capteurs comportent plus de pixels et les images peuvent avoir été prises de plus près que la station. Les images issues de la photogrammétrie ont ainsi plus de détails à apporter. Ces images, que l'on peut appeler externes du point de vue du laser, permettent une interprétation enrichie de l'ouvrage.

5.1.1.3. Complémentarité entre photogrammétrie et laser

La complémentarité entre les dispositifs laser et photogrammétrique a déjà été abordée¹³⁶. Il ne s'agit pas ici de répéter les arguments déjà avancés mais de les synthétiser pour aborder la combinaison d'un point de vue général. La complémentarité vise à utiliser un outil dans le domaine où il dépasse l'autre, et réciproquement.

5.1.1.3.1. Relevé semblable

Dans le comparatif que nous avons établi¹³⁷, ressemblances et différences ont été traitées dans le détail. La convergence des types de données et le but commun de modélisation rendent la complémentarité très crédible. Cependant, Il faut ajouter un point quant au relevé : la filiation aux phénomènes optiques donne un aspect analogue aux processus de relevé sur le terrain d'un point de vue techniques et stratégiques. De plus, un point s'ajoute à la faisabilité de la combinaison, en regard des considérations de prise de vue et d'anticipation de problèmes éventuels : l'analyse de l'ouvrage ne se fait qu'une seule fois. Des protocoles différents de prise de vue sont adaptés, mais le travail d'appropriation des contraintes du site est mis en commun. Cet argument vient s'ajouter aux recommandations d'anticipation¹³⁸ ce qui permettrait un apport supplémentaire à la mission.

¹³⁶ Cf. § 2.5.1

¹³⁷ Cf. §2.4

¹³⁸ Cf. § 5.1.1.1.2

5.1.1.3.2. Systématicité et pertinence

Les notions de systématicité et de pertinence des modes de création des données liées respectivement au balayage optique, d'une part, et à la photogrammétrie, d'autre part, sont maintenant connues¹³⁹. Dans l'objectif de combiner les moyens, l'utilisation des qualités de chacune des techniques conduit à un scénario d'utilisation ciblée et complémentaire, dans le but d'accélérer les processus en limitant l'intervention humaine. L'automatisation étant le point fort de l'acquisition laser, on favorise l'utilisation des données laser pour une majeure partie du processus. Le relevé photogrammétrique est également réalisé mais dans une optique de complément, avec le soin d'acquérir des données là où le laser peut présenter des manques et de prendre des clichés documentaires et de détails pour la photo-interprétation. La photogrammétrie prend le rôle de soutien et de complément en mettant en avant la maniabilité des appareils photos comparée à la nécessité de stations stables pour l'acquisition Laser. Des solutions pour acquérir des vues en hauteur en place photogrammétrie et bientôt en lasergrammétrie sont envisagées, en mettant en place un appareil numérique dans un hélicoptère miniature [ZIS00]. Le nuage de points est exploité, jusqu'à repérer les manques que l'on complète au mieux à l'aide des données photogrammétriques jusqu'à l'obtention des limites d'acquisition optique, dont les deux systèmes sont dépendants. Seules les données manquantes sont restituées par l'opérateur, l'intervention humaine est limitée à la segmentation pour le nuage de points et à la restitution complémentaire en photogrammétrie.

Le premier aspect de la combinaison des techniques d'acquisition vient d'être abordé. Il dépend de l'évolution des principes et des systèmes liés à la photogrammétrie et au balayage Laser. De notre point de vue d'utilisateur, la seule influence possible réside dans la mise en place d'une méthode d'emploi comme celle que nous venons de présenter. Le second volet de la combinaison, que nous allons traiter, considère les données comme prêtes à être utilisées pour la modélisation. La combinaison réside donc maintenant dans l'usage des éléments produits par les techniques.

¹³⁹ Cf. §2.4

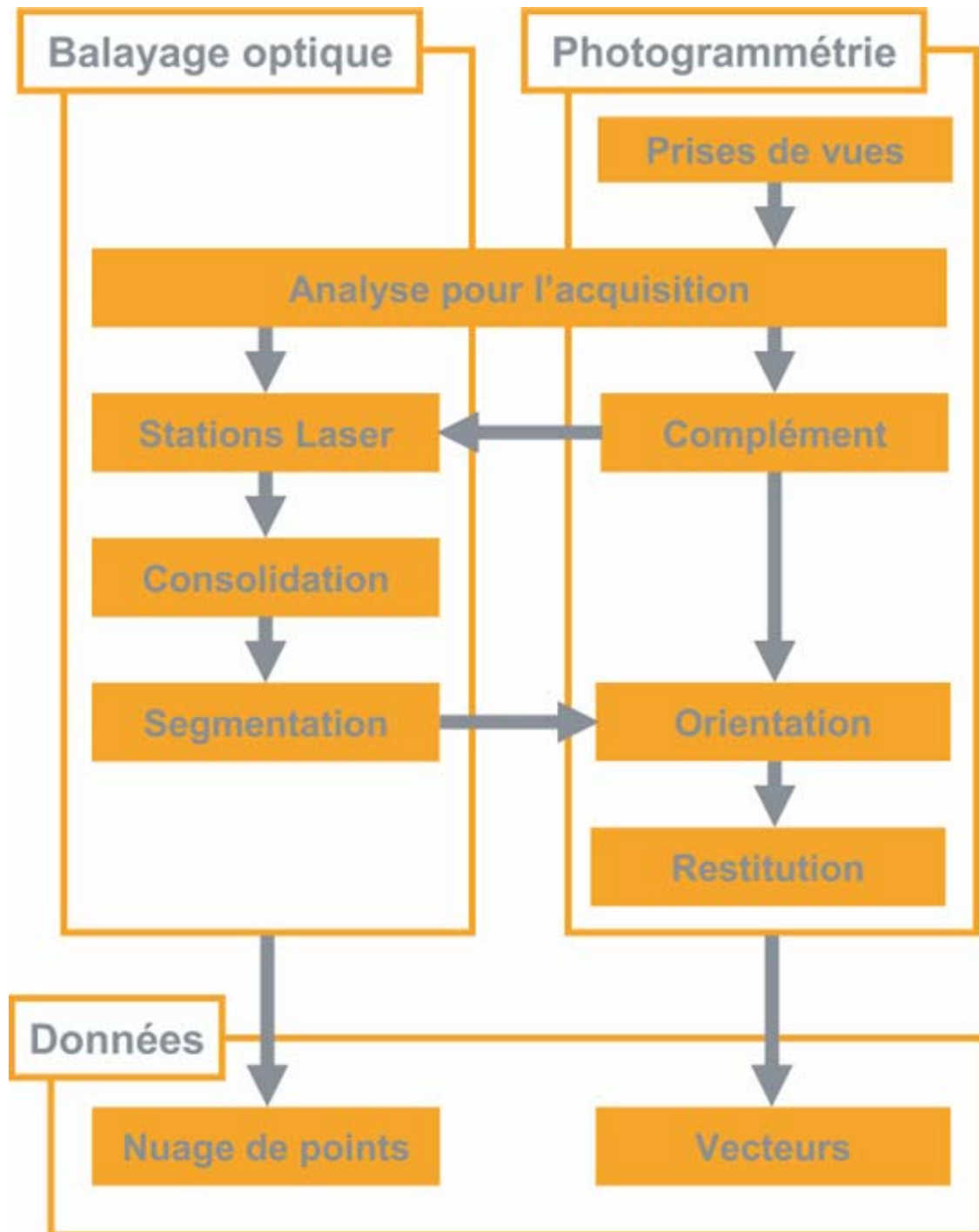


Figure 81 : combinaison pour l'acquisition des données

5.1.1.4. Manque de données

La combinaison des deux techniques d'acquisition que sont la photogrammétrie et le balayage optique permet, par leur complémentarité, d'apporter une dynamique intéressante au relevé d'ouvrages architecturaux. Néanmoins, il faut garder présent à l'esprit que l'utilisation conjointe des deux procédés ne pallie pas toujours le manque

de données. Il reste une part importante d'éléments à modéliser sans dimensions auxquelles se référer. Notre étude se devait d'essayer d'apporter des pistes quant au traitement de ces éléments à réaliser lors de la modélisation.

5.1.2. La modélisation guidée par les connaissances architecturales

Nous venons de traiter la combinaison du point de vue des techniques d'acquisition. Il s'agit d'explicitier ici la combinaison vue sous l'objectif de cette étude : modéliser au mieux un ouvrage bâti à l'aide des données produites. Cette présentation en deux parties ne doit pas cacher les interactions possibles qui ont été évoquées¹⁴⁰ quant au réservoir de données que constitue le nuage de points, d'une part, et aux mesures potentielles que constitue le bloc d'images orientées, d'autre part. En effet, ce deuxième point vient en complément du premier et non pas en alternative. La combinaison d'usage doit permettre la sublimation de jeux de données très complets et de masse importante en un objet représentant un ouvrage bâti de grande complexité.

5.1.2.1. Deux problèmes croisés

Un premier constat, en considérant les éléments en vis-à-vis, peut être dégagé : d'un côté l'ouvrage bâti dont on veut effectuer le relevé et dont on veut formaliser le modèle tridimensionnel est un objet complexe et cohérent, composé de nombreux éléments entrelacés ; d'un autre côté, la masse de données qui résulte de deux processus d'acquisition combinés est composée de millions de points. La mise en relation de ces deux problèmes doit mener à la traduction de l'ouvrage en un modèle, guidé par les informations dimensionnelles fournies par les données. La transformation automatique des données en modèle 3D ne donne pas encore de notre point de vue de résultats satisfaisants. Le maillage automatique est une transformation du nuage de points en une représentation intéressante et fidèle à l'objet du seul point de vue de l'apparence [MON06]¹⁴¹. La modélisation automatique par association de primitives géométriques ajustées au nuage de points fonctionne très bien pour les objets industriels de forme simple [CHA02], [HEU04] mais la forme architecturale ne peut pas encore être décomposée de cette façon. L'intervention du

¹⁴⁰ Cf. §2.4.3.2

¹⁴¹ Cf. §2.2.3.4 et figure 17

raisonnement spécifique de l'utilisateur n'a pas encore pu être subtilisée par un procédé automatisé. Seule l'intervention humaine peut gérer ce problème.

Il est possible d'aboutir à un modèle tridimensionnel d'un ouvrage bâti à partir de nuages de points à l'aide d'outils de modélisation perfectionnés [LUC06]. Dans cet exercice, la maîtrise des connaissances architecturales qui permettent l'analyse de l'édifice à modéliser, ainsi que des moyens de transformation des données, mais aussi et surtout, des outils de modélisation complexe, sont requis : trois compétences sont à réunir pour obtenir ce modèle.

Pour répondre au problème posé l'approche consiste à rationaliser la complexité résiduelle de l'ouvrage bâti pour mettre en œuvre la formalisation du modèle, afin de permettre l'intégration progressive de la masse de données.

5.1.2.1.1. Complexité de la forme architecturale

Nous pouvons considérer notre démarche comme une nécessité de généralisation en abordant la problématique de modélisation sous un aspect méthodologique¹⁴². Il s'agit donc, ici, de mettre en place un moyen de simplification d'ouvrage bâti quelconque, par opposition à la prouesse de transformation de données surabondantes sous-jacentes. La difficulté en abordant une problématique liée à la généralisation d'un phénomène réside dans la mise en place d'un dénominateur commun qui ne doit pas être réducteur.

La modélisation d'ouvrage est ainsi considérée comme une interprétation de la formalisation de l'ouvrage lui-même. Le modèle est une reproduction ; par conséquent, la copie du processus de formalisation de l'objet réel doit aboutir à sa réplique virtuelle. Notre démarche vise à traduire les étapes de formalisation de l'objet réel plus qu'à inventer un processus général de modélisation d'ouvrage. L'approche employée ne consiste pas à affirmer que tous les édifices sont conçus de la même façon, mais à rechercher des étapes de formalisation communes. L'objectif est d'obtenir un résultat similaire en enchaînant des étapes identifiées et moins complexes afin qu'elles soient intelligibles. La succession d'étapes de formulations communes à beaucoup d'ouvrages n'implique pas un confinement de l'application du principe à des formes particulières, mais au contraire, la spécification progressive

¹⁴² Cf. § 1.1.1.5

permet la formalisation d'éléments particuliers. Une fois le problème rationalisé, il est possible d'utiliser la décomposition effectuée comme un moyen de découpage de la masse de données.

5.1.2.1.2. Multitude de données à organiser

La complexité de l'ouvrage à modéliser est la cause de la complexité des données issues de la phase d'acquisition. La multitude d'informations tridimensionnelles vient du mode de mesure systématique du dispositif laser. La difficulté d'organisation des données peut être gérée au regard de la décomposition de la formalisation du modèle. La modélisation par étape, que nous proposons, sert d'assistant à la segmentation des données. L'intégration progressive des données est le lieu de la combinaison imposée pour notre recherche. Dans un premier temps, nous proposons de formaliser les éléments constitutifs d'une étape¹⁴³, puis de rechercher, dans le jeu de données, les informations qui permettent de les mettre aux bonnes dimensions. La modélisation précède, et, de ce fait, guide la recherche des données. L'organisation des données est ainsi pilotée par le besoin spécifique lié à la modélisation d'un élément. La segmentation est guidée par le besoin de données particulières.

5.1.2.2. Formalisation progressive du modèle

Les deux problèmes que sont la complexité d'un ouvrage bâti et la multitude des données nous ont conduit à l'élaboration du principe que nous examinons en détail. La réduction du problème permet sa résolution ainsi que l'association d'éléments dimensionnels identifiables. L'obtention du modèle final n'est possible que si la recombinaison des étapes est réalisable.

5.1.2.2.1. Processus par étape

La nécessité de décomposer la formalisation du modèle et de découper le jeu de données a abouti à la mise en place d'étapes de modélisation traduites du processus de conception même d'ouvrages architecturaux. C'est parce que ces étapes sont liées par l'analogie entre la conception architecturale et le processus de modélisation que la méthode que nous proposons est possible. La cohérence et l'aspect

¹⁴³ Cf. § 4.1.1.2

téléologique de la conception enrichie par les connaissances architecturales et l'analyse de l'ouvrage à modéliser rendent possible la modélisation que nous proposons. Notre méthode se décompose ainsi en cinq étapes principales¹⁴⁴. Les étapes correspondent à la définition de l'ouvrage avec une précision toujours croissante allant de la description de la forme globale à la modélisation des détails. La formalisation du modèle se fait donc progressivement.

5.1.2.2. Réduction progressive des données

La modélisation par étape, associée à la définition des éléments de la géométrie précédant le dimensionnement, a pour conséquence une gestion des données qui se fait au fur et à mesure de la construction du modèle. Chaque étape de formalisation nécessite une certaine quantité de données qui va permettre de dimensionner le modèle. Il y a donc une relation entre l'évolution de la géométrie et de la masse de données. Le nombre de faces modélisées et le nombre de points non exploités évoluent de façon inversement proportionnelle. L'état du nuage non utilisé informe aussi sur ce qu'il reste à modéliser. La définition du modèle étant indépendante des données dimensionnelles, le manque de données est facilement repérable. Il faut s'assurer que l'absence de données ne soit pas révélatrice d'une erreur de modélisation.

5.1.2.3. Bâtiment existant / Connaissances existantes

En réponse à la question principale de combinaison de techniques d'acquisitions, nous avons choisi d'élargir la source d'information à la documentation architecturale. Les connaissances sont une aide précieuse pour la compréhension et l'analyse de l'ouvrage.

5.1.2.3.1. Validation du modèle par la sémantique

L'intégration des connaissances ajoute de la pertinence à la segmentation car la richesse du vocabulaire permet d'affecter un nom décrivant l'élément à segmenter. Du fait de la description écrite qui est faite de l'ouvrage pour faciliter la réalisation et souvent la transmission orale des connaissances, chaque élément qui compose un bâtiment a un nom, ce qui au-delà de sa forme le rend particulier. La validation du

¹⁴⁴ Cf. § 4.1.4

découpage des données s'opère ainsi par l'association d'un élément sémantique cohérent. Cette action de validation est assez simple : un élément de modèle indéfinissable sémantiquement a de fortes chances de ne pas exister.

5.1.2.3.2. Validation des hypothèses de modélisation

L'acte de modélisation est parsemé de questions, et ainsi d'hypothèses quant à la manière de traiter un élément. Les ouvrages écrits sont nombreux et donnent la possibilité de trouver des réponses pour la formalisation, d'infirmer ou de confirmer les hypothèses qui sont faites. Elles sont aussi une aide à l'analyse¹⁴⁵. La prise en compte de l'aspect constitutif correct d'un ouvrage dès le début de la modélisation évite les retours en arrière dus aux erreurs et permet une meilleure prise en compte des étapes suivantes¹⁴⁶.

L'introduction des connaissances architecturales dans le processus que nous proposons est aussi motivée par l'apport unique de réponse qu'elles constituent quand les limites des outils d'acquisition sont atteintes. En effet, les phénomènes de masque se produisent assez fréquemment dans un processus de relevé et seules les déductions faites grâce à une base de connaissances architecturales permettent la complémentation du modèle.

¹⁴⁵ Cf. 4.2.2.1.1

¹⁴⁶ Cf. 4.4.3.1

5.2. Prospections

Le principe d'analogie entre conception architecturale et la modélisation d'ouvrage offre des possibilités de combinaison de données en simplifiant leur organisation. L'intégration de connaissances architecturales dans ce processus permet, en plus, de compléter les manques d'informations dimensionnelles et d'aider l'utilisateur dans la formulation de ses hypothèses de formalisation du modèle de l'ouvrage. Les outils implémentés permettent, d'ores et déjà, d'appréhender les possibilités qu'offrent cette proposition, mais le potentiel ne peut être réel qu'avec un système complet et efficace. C'est pourquoi, il est nécessaire de formuler un cahier des charges concernant les perspectives directes de ce travail.

5.2.1. Implémentation d'outils

Les premiers éléments, qu'il s'agit de faire aboutir, sont ceux qui ont déjà été évoqués dans ce travail : les outils utilisant le principe fonctionnel d'abord, puis viennent les outils indispensables pour la maîtrise du déroulement de la modélisation : les outils statistiques.

5.2.1.1. Intégration de l'aspect fonctionnel

Le principe d'implémentation fonctionnel a fait l'objet de recherches préliminaires pour cette étude¹⁴⁷. Une majeure partie de la structure des éléments déjà implémentés en dépend. Toutefois, les outils réellement fonctionnels ne sont pas encore intégrés à notre proposition. Il est possible d'en établir la liste et les interrelations avec le principe proposé.

5.2.1.1.1. Association avec la structure hiérarchique

La structure hiérarchique des éléments géométriques constituant le modèle¹⁴⁸ a une utilité vis-à-vis de l'utilisation fonctionnelle qui doit être faite des informations contenues dans la base de données. Chaque face créée est inscrite dans la base de données¹⁴⁹. Dans l'enregistrement relatif à toute face est prévu un champ où est enregistré son mode de création. Il contient le nom de la fonction qui l'a générée,

¹⁴⁷ Cf. §4.3.6

¹⁴⁸ Cf. §4.3.3.2

¹⁴⁹ Cf. §4.3.3

mais aussi les paramètres utilisés. À tout moment, il est donc possible de savoir comment chaque face du modèle a été créée. On peut ainsi, grâce aux paramètres enregistrés, connaître la manière dont la face mère¹⁵⁰ a été modifiée pour créer la face qui nous intéresse. Cette face fille est donc fonction de la face mère. Par propagation, et grâce au parcours de l'arbre hiérarchique des données, il est possible de remonter de face en face et d'établir cette relation fonctionnelle entre les faces ascendantes et descendantes.

IDFace	IDFAutoCAD	Semantique	IDSegment	Niveau	IDParent	Enfant	Transformation	IDPoint1	IDF
105	159	Facade_Grand_Rue	4	1	0	-1	0	28	
106	15A	Aile_Droite	12	2	49	-1	Div(D;0,0,4;1;0,5)	29	
107	15B	Aile_Gauche	15	2	55	-1	Div(G;0,0,4;1;0,5)	84	
108	15C	Fenêtre_Géminée_G	27	3	106	0	Base(0,1,0,2,0,5,0,1)	89	
109	15D	Fenêtre_Géminée_D	21	3	106	0	Base(0,1,0,2,0,1,0,5)	69	
110	15E	Fenêtre_Géminée_G	27	3	107	0	Base(0,1,0,2,0,5,0,1)	46	
111	15F	Fenêtre_Géminée_D	21	3	107	0	Base(0,1,0,2,0,1,0,5)	87	

Figure 82 : traçabilité des transformations et hiérarchie dans la base de données, extrait de la table des faces

5.2.1.1.2. Enregistrement d'actions / Répétitions

Le premier avantage de l'organisation fonctionnelle mise en place se situe au niveau de l'enregistrement d'actions¹⁵¹. En sélectionnant une face et le nombre de niveaux hiérarchiques, on peut copier un mode de création d'une face et l'appliquer à une autre. On intègre ici un outil de répétition comme le copier/coller caractéristique de l'informatique : on ne copie pas les faces concernées, on copie leur mode de création. Dans cette perspective, la produite s'adapte à la face mère qui lui aura été attribuée. Une caractéristique intéressante pour cet outil est la profondeur : les faces étant reliées par un lien de parenté, on peut spécifier le nombre de niveaux concernés par la copie. Une simple fenêtre peut ainsi être répétée depuis sa définition à l'étape 3¹⁵² jusqu'à l'étape 5¹⁵³, si la similitude formelle a été correctement validée. La structure de la base existante permet cette utilisation, l'outil de copier-coller peut s'intégrer aisément aux outils existants.

¹⁵⁰ Cf. §4.4.2.1

¹⁵¹ Cf. §4.3.6.1

¹⁵² Cf. §4.4.3.1

¹⁵³ Cf. §4.4.5

5.2.1.1.3. Historique

La deuxième application liée à l'intégration de l'aspect fonctionnel concerne la notion d'historique. Dans le logiciel de modélisation Maya [MAY06], chaque objet possède son historique. Il est possible de remonter dans le temps et de choisir une position ou une forme antérieure qu'avait l'objet concerné. Le principe d'historique ici est basé sur l'enregistrement des états successifs de l'objet au cours des modifications qu'il a subies. Ce type de procédé est très efficace, et permet un gain de temps, les retours en arrière étant relativement fréquents en modélisation. Néanmoins, on peut noter un inconvénient : ce type d'historique occupe une place en mémoire dépendante du nombre de modifications et de la complexité de l'objet. L'intérêt de l'intégration fonctionnelle des données réside en l'historique qui est inscrit dans la base même, et ce pour chaque objet, sans avoir à enregistrer tous les états, seules les faces parentes sont conservées¹⁵⁴ ce qui est radicalement différent. La mise en place d'une fonction de parcours de l'historique est indispensable quant à l'acte de modélisation qui est une recherche de la forme la plus fidèle relativement à l'objet à formaliser.

5.2.1.1.4. Bibliothèque de procédures

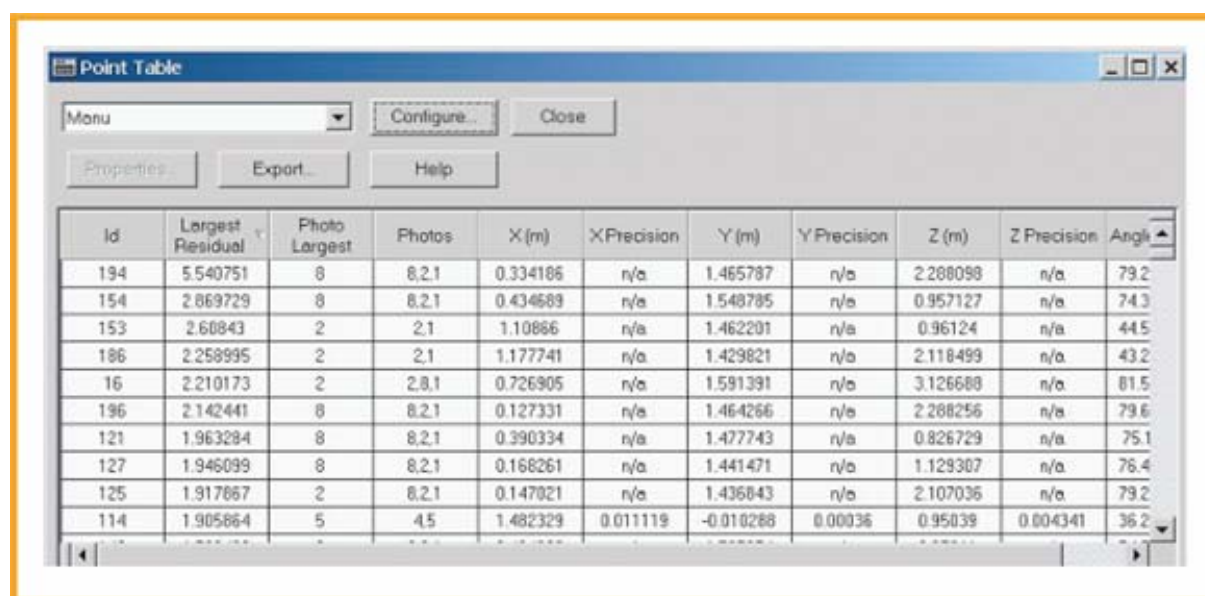
L'enregistrement d'actions où l'utilisation du principe fonctionnel permet de revenir sur un état antérieur sans enregistrer tous les états successifs et permet aussi de réutiliser l'objet considéré à un autre endroit du modèle. Mais la réutilisation d'un mode de création d'un objet peut être faite à plus long terme que le projet en cours et, ainsi, être l'objet d'un stockage externe au modèle pour permettre la mise en place d'éléments spécifiques pouvant être réutilisés ailleurs. La modélisation d'ouvrage peut ainsi être le moyen de capitaliser un savoir faire réutilisable. On peut imaginer un enrichissement de la bibliothèque de procédures correspondant à des objets au fur et à mesure de projets de modélisation, facilitant le réemploi d'objets couramment utilisés. Dans la perspective d'une utilisation courante, la mise en place d'objets prédéfinis apporterait une amélioration sans cesse grandissante de la rapidité de modélisation. Selon un autre point de vue, l'entretien d'une telle bibliothèque peut constituer une base de cas pour des études formelles liées à des typologies précises d'éléments architecturaux.

¹⁵⁴ Cf. §4.4.2.2

L'« orientation fonctionnelle » qui a été donnée à la structuration des données associée au modèle de notre proposition permet une souplesse d'emploi pour l'utilisateur et, en même temps, ouvre des perspectives d'enrichissement des connaissances architecturales par la mise en place d'une bibliothèque d'éléments architecturaux réutilisables.

5.2.1.2. Outils d'analyse

Le processus de modélisation proposé dans ce travail de recherche induit la constitution d'une base de données, donne les moyens de gérer le modèle de façon efficace et de pouvoir appliquer des traitements aux objets de façon groupée à travers les dispositifs de requêtes perfectionnés. Si l'on considère la base dans son état de fonctionnement, elle contient une quantité d'informations intéressantes mais non visibles, si la géométrie est considérée comme la seule représentation de la base. L'utilisation d'outils de mesure implique la maîtrise des données produites, notamment par l'édition de résultats numériques de calculs de précision. On peut citer comme exemple la table des points du logiciel Photomodeler comme outil de contrôle des données. De la même manière, on peut imaginer ce genre d'outils pour permettre le contrôle du modèle.



Id	Largest Residual	Photo Largest	Photos	X(m)	X Precision	Y(m)	Y Precision	Z(m)	Z Precision	Angle
194	5.540751	8	8,2,1	0.334186	n/a	1.465787	n/a	2.288098	n/a	79.2
154	2.869729	8	8,2,1	0.434689	n/a	1.548785	n/a	0.957127	n/a	74.3
153	2.60843	2	2,1	1.10866	n/a	1.462201	n/a	0.96124	n/a	44.5
186	2.258995	2	2,1	1.177741	n/a	1.429821	n/a	2.118499	n/a	43.2
16	2.210173	2	2,8,1	0.726905	n/a	1.591391	n/a	3.126688	n/a	81.5
196	2.142441	8	8,2,1	0.127331	n/a	1.464266	n/a	2.288256	n/a	79.6
121	1.963284	8	8,2,1	0.390334	n/a	1.477743	n/a	0.826729	n/a	75.1
127	1.946099	8	8,2,1	0.168261	n/a	1.441471	n/a	1.129307	n/a	76.4
125	1.917667	2	8,2,1	0.147821	n/a	1.436843	n/a	2.107036	n/a	79.2
114	1.905664	5	4,5	1.482329	0.011119	-0.010288	0.00036	0.95039	0.004341	36.2

Figure 83 : table des points dans Photomodeler

5.2.1.2.1. Maîtriser l'évolution du modèle

Le modèle géométrique se construit au fur et à mesure de l'établissement de relations entre éléments, d'associations de données et de formulations d'hypothèses. Les faces qui constituent le modèle peuvent être de nature très différente. Elles sont soit dimensionnées simplement, soit le résultat uniquement d'hypothèses architecturales, si elles se situent dans des zones qui ne sont pas couvertes par les jeux de données, soit, enfin, la combinaison des deux. La diversité d'origine de mise en place de ces faces doit être représentée à la demande de l'utilisateur, pour lui permettre d'associer des données supplémentaires où le besoin s'en ressent ou encore d'émettre le besoin d'acquérir des données complémentaires (si l'ouvrage est accessible facilement). L'affichage du modèle ainsi représenté est aussi un moyen pertinent de communiquer l'origine réelle des faces (dimensionnelle, hypothétique ou mixte). En fonction de l'utilisation du modèle, cette « transparence » peut se révéler très intéressante. Le modèle n'est pas seulement la figuration d'un état géométrique mais aussi le résultat d'une formalisation complexe.

5.2.1.2.2. Liens entre données et faces modélisées

Si l'on poursuit l'énumération de moyens de représentation du contenu de la base de données, on peut citer, au regard de ce qui se fait déjà dans des logiciels de modélisation, tels que Maya, les multiples représentations d'arbres relationnels entre différents types d'informations. Dans notre cas de combinaison, et pour poursuivre la nécessité d'assistance de l'utilisateur dans son opération de modélisation, on peut proposer un outil de représentation de l'origine des données permettant le dimensionnement des faces. En effet, une face peut être issue de plusieurs types de données à la fois. Imaginons un lieu géométrique, intersection de trois plans, une face ayant un sommet en ce lieu. Les trois plans peuvent être issus de trois nuages de points distincts, cette diversité se répercutant sur la face elle-même. L'utilité d'un tel outil est perceptible par l'utilisateur soucieux de précision, par exemple.

5.2.1.2.3. Connaître la précision

L'affichage de la précision des données utilisées est lié au point précédent. La mise en place de combinaisons de données est directement la cause de ce besoin. Notre problématique induit la variété des provenances des données et ainsi la différence

entre les précisions respectives. Une traçabilité vis-à-vis de sources de dimensionnement d'un objet s'avère utile à un bon déroulement de l'intégration des données dimensionnelles. Les dispositifs à balayage optique assurent une précision homogène alors que la photogrammétrie permet la vérification de la précision de chaque point, cependant plus sujette à variation¹⁵⁵. De telles différences n'ont pas toujours d'influence sur le résultat final du modèle mais l'utilisateur peut avoir à connaître, à un moment donné, les précisions respectives des objets qu'il modélise, notamment par souci de cohérence à un niveau de détail précis. Un détail peut difficilement être dimensionné avec des points dont la précision est de l'ordre de grandeur de ce détail.

La formalisation du relevé d'ouvrage architectural vise à l'obtention d'un modèle tridimensionnel comme représentation. La mise en relation des données permettant d'y parvenir donne la possibilité, en les croisant de façon pertinente, d'obtenir d'autres représentations significatives du modèle architectural. Les outils à implémenter pour les mettre en œuvre sont des outils d'analyse du modèle et de ses caractéristiques et peuvent aussi aider à la compréhension de la mise en forme du modèle. Ils peuvent, ainsi, être des moyens d'aide à la modélisation, d'une part, et des dispositifs d'analyse du modèle fini, d'autre part.

5.2.2. Possibilité de création d'outil pour l'utilisateur

Le processus de modélisation d'ouvrage, que nous proposons et dont nous avons implémenté les principes, ne doit pas être issu d'une seule personne. L'utilisation d'un système est source de critiques de la part des utilisateurs. Celles-ci doivent pouvoir être intégrées pour l'amélioration de la proposition qui n'est certes pas complète et qui concerne, de plus, un domaine ouvert, à savoir la modélisation d'ouvrages bâtis, ce qui la rend donc améliorable indéfiniment.

Le principe essentiel de la méthode que nous proposons consiste en l'intégration des connaissances architecturales pour la modélisation. Celle-ci, dont l'objectif est d'aboutir à une copie de l'ouvrage étudié, correspond ainsi à l'application des principes retrouvés de formalisation de l'ouvrage même.

¹⁵⁵ Cf. §2.4.4

5.2.2.1. Analyse

La modélisation d'ouvrages bâtis à base de données tridimensionnelles révèle l'incomplétude des informations qu'elles fournissent. Certains éléments du bâtiment ne peuvent pas être dimensionnés. Nous préconisons à cet effet l'utilisation des connaissances architecturales pour tenter de pallier ce manque de données. Malheureusement, il arrive que même la documentation architecturale à disposition ne puisse permettre d'émettre les hypothèses de formalisation. C'est donc l'ouvrage lui-même, si l'on considère le fait que l'élément que l'on cherche à modéliser en fait partie, qui peut permettre d'arriver à cette fin. L'analyse de l'ouvrage, ici comme dernier recours, permet donc la création de connaissances architecturales. La pratique de la modélisation d'ouvrages bâtis est donc une source de connaissances. Celles-ci appartiennent à l'utilisateur qui parvient à finaliser l'élément problématique. Il faut permettre une transmission de cette connaissance accumulée.

5.2.2.2. Intégrer les acquis de l'utilisateur

L'intégration des connaissances originales acquises par l'utilisateur lors de ses expériences de modélisation antérieures doit être rendue possible, afin de permettre d'accumuler un savoir faire et pouvoir le transmettre à d'autres utilisateurs.

5.2.2.2.1. Enregistrement du savoir faire

Le premier moyen de communiquer les connaissances acquises consiste à les utiliser pour la modélisation. L'enregistrement d'actions dont les bases ont été mises en place grâce aux principes fonctionnels permet d'enregistrer l'élément modélisé sous forme de procédure de génération. Si l'on veut réutiliser cette procédure, il suffit de l'affecter à une face, pour qu'elle s'y adapte et recrée l'objet enregistré. L'enregistrement de la procédure de formalisation de l'élément constitue une première façon de garder la connaissance acquise. Ce principe permet, certes, une réutilisation de la connaissance créée, mais reste limité.

5.2.2.2.2. Réutilisation durable

L'enregistrement d'action peut être utilisé autrement que comme une procédure dans une bibliothèque. On peut facilement imaginer que la procédure puisse faire partie du jeu d'outils mis à la disposition de l'utilisateur pendant les étapes de modélisation.

Cette personnalisation de l'interface de travail est imaginable au regard des autres interfaces de modélisation comme AutoCAD ou Maya. L'utilisateur peut programmer des boutons qui effectuent le travail répétitif ou des tâches bien spécifiques à sa place. Ces personnalisations sont à considérer comme des scripts agissant sur la géométrie. Mais, il faut avoir à l'esprit que, dans notre cas, il faut prendre en compte la traçabilité du nouvel outil dans la base de données. En effet, il doit être utilisable comme les autres outils pour les raisons déjà évoquées¹⁵⁶.

¹⁵⁶ Cf. §5.2.1.1

5.3. Conclusion

La combinaison des techniques d'acquisition peut être considérée selon deux points de vue différents : d'une part, le point de vue de l'utilisateur des techniques qui permet d'examiner un emploi combiné de ces procédés, d'autre part, la perspective d'exploitation que nous proposons dans ce travail. Il faut considérer notre contribution comme une proposition ouverte, qui vise une direction mais à laquelle il est possible d'ajouter encore des éléments pour la conforter.

6. Conclusion générale

Ce travail a été motivé par la nécessité de combler les manques de données rencontrés par l'usage de techniques d'acquisition séparées. Certes, la combinaison de l'acquisition photogrammétrique et du balayage optique permet un enrichissement du jeu de données, cependant, les manques subsistent. Nous proposons un processus de relevé assisté par les connaissances architecturales qui permettent la définition des éléments non mesurables.

La mise en place d'une méthodologie de relevé, à base de combinaison de techniques d'acquisition, se répartit en deux phases liées au principe même du relevé [SAI92], à savoir la mesure et la mise en forme du modèle. La combinaison intervient donc sur ces deux aspects.

6.1. Combinaison de techniques

La combinaison de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie pour l'acquisition se révèle réalisable avec les procédés ayant des points communs¹⁵⁷ sur les modes d'acquisition et des complémentarités possibles au niveau de la production de données. Il reste à prendre en compte la gestion des inconvénients majeurs de chacune des techniques. La combinaison doit être considérée comme un moyen de lisser les défauts majeurs pour optimiser à la fois l'intervention sur site et le jeu de données. On peut noter trois contradictions majeures où ces complémentarités doivent être mises en place.

La première est celle de l'automatisme. Le balayage optique est le processus d'acquisition le plus autonome par rapport à l'opérateur quant à la génération des données, par opposition à la réalisation des mesures photogrammétriques. Les deux contradictions sont étroitement liées : les mesures manuelles des données photogrammétriques ont une grande pertinence puisqu'elles sont choisies par l'opérateur alors que les mesures au laser sont réalisées de manière plus aléatoire, indépendamment du bâtiment à mesurer.

L'automatisation est, en effet, synonyme de masse de données régulières mais aléatoirement saisies alors que le restituteur photogrammétrique choisit les données à produire. Enfin, le troisième élément d'opposition se base sur le point de vue de la flexibilité du dispositif d'acquisition. Etant donné la durée de la prise de vue, on utilise le scanner avec un trépied alors que la photogrammétrie ne nécessite qu'un appareil photographique.

Ces trois axes orientent les choix de procédés vers une efficacité optimale, mais aussi vers une sécurité au niveau des données. L'automatisation autorise une abondance des données. La réduction de l'intervention de l'opérateur en restitution permet l'augmentation des prises de vues sur le terrain. Ces évaluations ne sont pas quantifiables car elles changent en fonction des objets à relever et du contexte d'accès à l'objet, mais les techniques évoluent en permanence et modifient ainsi les

¹⁵⁷ Cf. 5.1.1.2

modalités de relevé. Un protocole est néanmoins possible pour permettre une utilisation optimale¹⁵⁸.

6.2. Combinaison de documentations

Le deuxième volet de notre recherche, qui en est aussi le principal, se positionne au niveau de la formalisation du modèle. Le constat de manque de données issues de l'acquisition photogrammétrique, d'une part, et lasergrammétrique, d'autre part, reste valable malgré la combinaison pendant l'acquisition. Cette situation n'est pas un résultat de notre recherche, elle est liée au principe même des techniques d'acquisition : ce qui n'est pas visible ne peut être mesuré.

6.2.1. Connaissances architecturales

L'hypothèse d'intégrer d'autres moyens de formalisation du modèle -et donc de ces manques- est directement liée à la nature de l'objet. Les connaissances architecturales sont indissociables de l'édifice lui-même. La prise en compte des connaissances architecturales change l'attention de l'étude qui se déplace de la considération dimensionnelle de l'ouvrage vers la prise en compte de sa composition d'ordre général. L'objectif reste le même : nous cherchons à mettre en place un procédé de formalisation de modèle d'ouvrage. Le glissement de la recherche depuis la documentation dimensionnelle vers la documentation architecturale apporte des pistes pour l'amélioration de la gestion des données produites par ces techniques ainsi qu'une voie pour la modélisation inspirée de la formalisation même de l'ouvrage.

6.2.2. Modélisation

La démarche de recherche considère deux problèmes. Le premier est lié à la complexité d'un édifice et le second est causé par la masse de données issues des techniques d'acquisition. L'objectif était de mettre en place une méthodologie permettant de gérer ces deux réalités.

¹⁵⁸ Cf. 5.1.1.3

6.2.2.1. Analogie de formes

Dans notre cas, il s'agit d'un modèle formel. Le modèle auquel nous voulons aboutir correspond à la représentation numérique de la forme de l'ouvrage architectural. Nous assistons donc à l'analogie entre les deux états : entre l'ouvrage existant et le modèle. L'acquisition des dimensions de l'ouvrage par les procédés pris en compte dans cette étude relève de cette analogie formelle. En effet, la récupération des caractéristiques formelles, très étroitement liées aux dimensions de l'ouvrage, permet d'aboutir à la représentation tridimensionnelle de l'édifice. La résolution d'un problème consiste à isoler le phénomène, à le résoudre, et finalement à tenter de généraliser la solution trouvée. Il en est de même pour la modélisation. On cherche à établir la représentation tridimensionnelle d'un ouvrage. Une fois celle-ci complétée, on essaye d'appliquer ce qui a été mis en œuvre lors de la modélisation d'un autre bâtiment. Cette généralisation est enfermée par la considération de la forme. Les résultats de modélisation obtenus ne sont réutilisables que dans un contexte formel précis. Le potentiel de réutilisation d'un élément, quel qu'il soit, s'accroît avec sa capacité à s'adapter au nouveau contexte. La création d'objets géométriques paramétrables va dans ce sens. La flexibilité de ces objets facilite leur utilisation dans un grand nombre de modèles d'ouvrages constitués, en partie, d'éléments représentés par ces objets paramétrés. La prise en compte d'une généralisation d'un tel procédé n'est pas un objectif fondamental de ce type de recherche, mais elle permet à celle-ci de s'inscrire dans un élan plus important que la gestion d'un seul type d'ouvrage. L'analogie de forme peut être considérée comme un objectif à atteindre mais il existe d'autres moyens d'y parvenir.

6.2.2.2. Analogie de processus de formalisation

La phase de construction du modèle à partir de ces données est une démarche qui nécessite une méthode se déroulant sur une durée de temps conséquente.

En vue de contribuer à la résolution des problèmes causés par l'emploi de cette masse de données pour modéliser un objet aussi complexe, nous proposons de considérer l'analogie entre les processus de formalisation des deux éléments plutôt que l'analogie de leur aspect formel, sachant que les deux processus aboutissent respectivement à la forme de l'édifice et à la forme du modèle. L'intérêt de cette

démarche vient de la constatation suivante : les connaissances architecturales sont, en grande partie, investies pendant la conception de l'édifice. Elles sont progressivement intégrées à la conception jusqu'à la définition finale de l'ouvrage. C'est donc pendant la conception que la complexification de l'édifice se fait.

Pour mettre en place ce principe, nous avons analysé les étapes de conception du point de vue de représentations intermédiaires qui en sont faites. Nous en avons identifié cinq allant de la représentation en plan à l'échelle du 500^{ème} jusqu'au 10^{ème}¹⁵⁹. Chaque niveau de détail permet de définir l'organisation d'éléments spécifiques. Ces niveaux de détail s'enchaînent par modifications successives jusqu'à l'obtention de l'ouvrage définitif dans toute sa complexité. Cette composition progressive de la complexité de l'ouvrage est à l'origine de notre proposition. L'analyse et la traduction de ces niveaux de détails en étapes de formalisation ont dû être réalisée afin de permettre la formalisation d'éléments identifiables à mettre en place à chaque étape et d'assurer la transition entre elles. Les éléments qui constituent le modèle sont en relation avec les autres et reproduisent les principes de composition de l'ouvrage. Les relations qui sont utilisées ici sont liées, par exemple, à la symétrie, la répartition, le réseau ou encore à la proportionnalité.

Une fois le moyen de mise en œuvre de la géométrie défini, il reste à prendre en compte l'intégration des données dimensionnelles au modèle. Nous avons vu que le processus de formalisation peut être effectué de façon indépendante des caractéristiques dimensionnelles. Les formes sont organisées de façon relationnelle. Nous proposons d'intégrer la considération dimensionnelle de façon *a posteriori*. Les éléments sont ajustés à leurs vraies dimensions uniquement après avoir été définis à la manière d'une variable, dans un programme, qui est déclarée avant d'être affectée d'une valeur. À chaque fin d'étape de définition, les éléments qui y auront été définis se voient affectés des données qui les dimensionnent. Du point de vue de la gestion des données, notre proposition apporte deux concepts. Les deux ont une influence sur la segmentation du nuage de points. Le premier provient du dimensionnement postérieur à la mise en forme. L'élément préexiste, il est donc aisé d'associer les données correspondantes. La segmentation est ainsi guidée par le modèle. Le

¹⁵⁹ L'échelle du détail auquel on veut aboutir fait varier le nombre d'étapes. Nous avons fixé le 10ème comme limite car il permet de définir des éléments de l'ordre du centimètre, ce qui englobe la majeure partie des éléments discernable d'un ouvrage, mais on peut augmenter d'un niveau encore.

second concept traite de la réduction de la quantité de données. Les éléments respectifs des étapes successives sont de grandes dimensions pour la première et réduisent de taille au fur et à mesure du processus. En effet, un élément de l'étape « formes de base »¹⁶⁰ est une façade. Or, l'acquisition systématique implique une grande quantité de points, même sur des plans, dont en théorie seuls trois points sont nécessaires. La suppression de grandes quantités de points, telles que ceux qui correspondent à la qualification dimensionnelle de façades, réduit considérablement le nombre de points. Il en va de même à la fin de chaque étape. Le nuage de points est simplifié graduellement, les éléments les plus simples à percevoir sont ôtés du nuage et rendent le nuage plus lisible par rapport aux éléments plus complexes. De plus, les points restant dans le modèle correspondent à des éléments qui n'ont pas encore été modélisés. La visualisation du nuage permet de maîtriser les manques éventuels de données concernant le dimensionnement des étapes ultérieures, mais donne aussi un aperçu de ce qu'il reste à modéliser.

6.3. Contributions à la recherche

L'étude que nous avons réalisée se caractérise par son aspect transversal quant à son déroulement, d'une part, et ce qu'elle produit, d'autre part.

6.3.1. Transversalité

L'intégration d'un architecte dans une équipe de topographes est une expérience enrichissante et ce à deux niveaux. D'une part, le côté formateur que représente cette immersion totale dans le monde de la mesure a été le moyen de participer aux projets de relevés d'ouvrages¹⁶¹, et, d'autre part, le point de vue extérieur sur l'architecture que peut apporter la collaboration avec des topographes.

6.3.2. Complémentarité

Notre travail se situe entre les deux domaines ou plus précisément à l'intersection. Nous avons investi les connaissances architecturales dans une problématique pratiquée de manière différente, habituellement, par les architectes et avec des outils très pointus¹⁶². Nous avons constaté que l'apport des connaissances architecturales

¹⁶⁰ Cf. §4.1.4.1

¹⁶¹ Cf. §1.2.3.1 à § 1.2.3.3

¹⁶² Cf. § 2

donnait la possibilité d'agrandir le champ d'action des outils d'acquisition en permettant de compléter les données non disponibles.

6.3.3. Essai de transmission de connaissances

L'intégration des connaissances, dans la méthode que nous proposons et dans les outils qui y sont liés, donne la possibilité de les utiliser sans formation préalable à la « culture » architecturale. Cette encapsulation des connaissances prend ici un sens positif¹⁶³, car elle permet d'utiliser les connaissances dont il n'a pas fallu tirer de signification. La méthodologie proposée est une approche visant à intégrer des connaissances architecturales nécessaires à la formalisation d'ouvrages pour un processus accessible, et facilitant l'utilisation des données.

6.4. Extension de la problématique

Les développements liés à cette proposition peuvent être enrichis. Dans ce travail, les éléments essentiels ont été validés, mais pas le processus dans son ensemble, car les outils ne sont pas tous développés. Outre la complémentation des fonctions évoquées¹⁶⁴, il est envisageable d'intégrer la problématique liée aux modèles normalisés par les formalismes XML¹⁶⁵ dédiés aux bâtiments. L'enregistrement du modèle dans un format standard et partagé s'inscrit dans la problématique patrimoniale. Les relevés sont faits dans des buts précis, pour des prises en compte de conservation ou encore pour des volontés de représentation.

L'application du principe tel qu'il est implémenté à des représentations réalistes par le biais de placages de texture n'est pas concevable, car la restriction que nous avons faite pour faciliter l'implémentation et qui consistait à ne traiter que les faces à quatre sommets maximum appauvrit dans ce cas la représentation. Il est envisageable de prendre en compte la gestion d'objets géométriques plus complexes, tels que des NURBS. La possibilité d'utilisation de textures dans cette proposition de méthodologie de relevé basée sur la combinaison emploierait, d'une

¹⁶³ Contrairement au §3.2.1.3, où nous évoquions l'encapsulation des connaissances dans des représentations spécifiques.

¹⁶⁴ Cf. 5.2

¹⁶⁵ XML : eXtensible Markup Language, Langage normalisé et modulable, permettant la description d'objets et la diffusion des informations.

Elaboration d'une méthodologie de relevé d'objets architecturaux

façon supplémentaire, les images déjà acquises ce qui permettrait d'exploiter les données sous une autre forme.

7. Bibliographie

[AFN94] Afnor, NF X 07-001. (2000)

Normes fondamentales, Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, Afnor, Ed. Paris, Décembre 1994.

[AFT00] Lexique de l'Association Française de Topographie. (2000).

dernière consultation : 17 avril 2006.

site : <http://aftopo.club.fr/publications/lexique/pagelexique.htm>

[ALB01] Albertz, J. (2001)

Albrecht Meydenbauer, Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. XVIIIth International Symposium CIPA 2001 18-21 Septembre 2001 Potsdam. Allemagne. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Volume XXXIV -5\C7 ISSN 1682-1750. pp19-21

[ALB04] Alby, E., Grussenmeyer, P., Perrin, J.-P. (2004)

Visualization of architectural works by photogrammetry: a compromise between measurement and representation. International CIPA Workshop on Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres. 25-27 Octobre 2004, Lisbonne, Portugal, 11 pages.

[ALB05] Alby, E., Grussenmeyer, P., Perrin, J.-P. (2005).

Analogy between the architectural design process and the documentation of architectural works. In XXth CIPA International Symposium, Turin, Italie. Sept. 26th. Oct 1st, 2005. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXVI-5/C34 ISSN 1682-1750 & CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XX-2005 ISSN 0256-1840, pp. 631-636.

[ALB1553] Alberti, L.-B. (, 1553.)

Art de bien bâtir. Dix livres, traduction de Jean Martin. Editions Laques kevuer. Paris.

[AND05] Andrews, D.P., Beckett, N.J. Clowes, M., Tovey, S.M. (2005)

A comparison of rectified photography and orthophotography as applied to historic floors – with particular reference to Croughton Roman Villa. In XXth CIPA International Symposium, Turin, Italie. Sept. 26th. Oct 1st, 2005. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXVI-5/C34 ISSN 1682-1750 & CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XX-2005 ISSN 0256-1840.

[AUT06] AutoCAD d'Autodesk. (2006)

Dernière consultation 5 septembre 2006

site : <http://www.autodesk.fr/adsk/servlet/index?siteID=458335&id=6693306>

[BAL99] Baltsavias, E. P. (1999)

A comparison between photogrammetry and laser scanning

ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999).83–94.

[BAR02] Barth, S. (2006)

Defining Knowledge Management. DestinationKM.

Dernière Consultation 3 septembre 2006.

Site : <http://www.destinationkm.com/articles/default.asp?ArticleID=949>

[BAZ04] Bazin, G. (2004)

Conservation des œuvres d'art. Partie d'article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique.

[BEA05] Beal, M.-P. (2005)

Cour de programmation fonctionnelle en ligne. Université de Marne-la-Vallée, 2005.

Dernière consultation 5 septembre 2006

Site : <http://www-igm.univ-mlv.fr/~beal/Enseignement/Logique/index.html>

[BEG03] Begriche, R. (2003)

PROFIL – du nuage de points au modèle 3D. Mémoire de DEA MSEB, MAP-CRAI, Nancy.2003.

[BER04] Beraldin, J.-A. (2004)

Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry - The Last Decade and Beyond. XXth Congress. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Istanbul, Turquie. Du 12 au 23 juillet 2004. Commission VII, pp. 972-983.

[BON93] Bonhomme, B. (1993)

Représentation des formes urbaines. Les métiers de l'histoire de l'architecture, école d'architecture de Grenoble. 1993.

[BRA97] Brakchi, R. (1997)

Contribution au projet PAROS: Représentation et modélisation du chapiteau corinthien. Mémoire de DEA. MAP-GAMSAU, Marseille. 1997

- [BRU99] Brunet, R. (1999)
Conclusion d'une conférence prononcée le 24 novembre 1999 et publiée dans le Bulletin de la Société de Géographie de Liège, 2000, n°2, p. 21-30.
- [BUR03] Bur, D. Chevrier, C. Perrin, J.-P. (2003)
Architecture as a reference for the development of a CAD lighting tool. Actes du congrès CAADRIA 2003, Bangkok, Thaïlande, 3-5 Mai 2003
- [BUR05] Burtch, R. (2005)
History of photogrammetry. Ferris State University.
Dernière consultation 17 avril 2006.
<http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/sure340/notes/History.pdf>
- [CAC04] Cachelou, J. (2004)
Stéréoscopie. Article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique.
- [CAP05] Capra, A., Costantino, D., Rossi, G., Angelini, MG, Leserri, M. (2005)
Survey an 3D modelling of Castel del Monte. In XXth CIPA International Symposium, Turin, Italie. Sept. 26th. Oct 1st, 2005. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXVI-5/C34 ISSN 1682-1750 & CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XX-2005 ISSN 0256-1840.
- [CAR68] Carbonnell M. (1968)
L'histoire et la situation présente des applications de la photogrammétrie à l'architecture. Etude sur la photogrammétrie appliquée aux monuments historiques. ICOMOS, Saint-Mandé, France, 1968.
- [CHA75] Charte Européenne du Patrimoine Architectural. (1975)
Adoptée par le Conseil de l'Europe, octobre 1975
- [CHA80] Chastel, A. (1980)
Patrimoine monumental, article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique. A partir de : La notion de patrimoine, Revue de l'art 1980
- [CHA02] Chaperon, T. (2002)
Segmentation de nuage de points 3d pour la modélisation automatique d'environnements industriels numérisés. Thèse en informatique, Ecole des Mines, Paris, 250p. 2002
- [CHO92] Choay, F. (1992)
L'allégorie du patrimoine. Seuil, Paris, 1992. 272 p. ISBN : 2-02-014392-5
- [CIP04] Statuts du Comité International de Photogrammétrie Architecturale. (2004)
- [COM03] Comyn-Wattiau, I., Akoka, J. (2003)
Les bases de données. Que sais je ? Presse universitaires de France. Paris.
- [CUN04] Cunin, O. (2004)
De Ta Prohm au Bayon : analyse comparative de l'histoire architecturale des principaux monuments du style du Bayon. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. 29 Octobre 2004

[Dra98] Drap, P., Gaillard, G., Grussenmeyer, P., Hartmann-Virnich, A. (1998)
A stone-by-stone photogrammetric survey using architectural knowledge formalised on the arpenteur photogrammetric workstation. Actes du XIXème Congrès de l'ISPRS, 16-23 juillet 2000 Amsterdam.

[DUR03] Durant, J.-P. (2003)
La représentation du projet : approche pratique et critique. Collection école d'architecture de Grenoble. Edition de la Villette. Paris 2003. ISBN 2-903539-77-4.

[FLE04] Fleury, P., Legay, F., Liberman, S., Orszag, A., Antonetti, A. (2004)
Lasers. Article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique

[FUC04] Fuchs, A., Alby, E., Begriche, R., Grussemeier, P., Perrin, J.-P. (2004).
Confrontation du relevé laser 3D aux techniques de relevé conventionnelles et développement d'outils numériques pour la restitution architecturale. Revue de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection n°173/174 (2004-1/2, pp. 36-47.

[GAI05]. Gaildrat, V. (2005)
Modélisation déclarative. Espace de travail pour la communauté française qui s'est constituée autour d'une action spéciale du CNRS (AS) ayant pour sujet la modélisation géométrique par contraintes.
Dernière consultation 3 septembre 2006.
Site : http://axis.u-strasbg.fr/kaWa/index.php/Mod%E9lisation_D%E9clarative.

[GDT05] Office québécois de la langue française, 2005, Grand dictionnaire terminologique.
Dernière consultation : 11 avril 2006.
Site : www.granddictionnaire.com

[GDT93] Office de la langue française, 1993, Grand dictionnaire terminologique.
Dernière consultation : 11 avril 2006.
Site : www.granddictionnaire.com

[GOL06] Golvin, J.-C. (2006)
L'image de restitution et la restitution de l'image. Support de cours du DPEA du MAP-GAMSAU. Ecole d'architecture de Marseille.
Dernière consultation le 5 septembre 2006.
Site : www.map.archi.fr/cycle3/DPEA_MCAN/SupportsCours/JCG2.pdf

[GOU99] Goulette, F., (1999)
Modélisation 3D automatique, outils de géométrie différentielle. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris. 1999

[GOU02] Goulette, F. (2002)
Numérisation et modélisation 3D, systèmes et études de cas. – Acte Séminaire MICAD du 27 mars 2002, Paris.

[GRO85] Gros, P (1985)
Vitruve. Edition 1985. Article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique

- [GRU00] Grussenmeyer, P., Guillemin, S. (2000)
Patrimoine et photogrammétrie architecturale, 1992-1999 : 8 ans de projets à l'ENSAIS. Revue ARTS et INDUSTRIES n°248, Janvier 2000, ISSN 0004-3982
- [GRU02] Grussenmeyer, P., Hanke, K., Streilein, A., (2002)
Architectural photogrammetry. Chapter in « Digital Photogrammetry », edited by M. KASSER and Y. EGELS, Taylor & Francis (2002), pp. 300-339.
- [GRU04] Grussenmeyer, P., Koehl, M., Neusch, T., Meyer, E., (2004).
Cours de topographie en ligne <http://photogeo.insa-strasbourg.fr>, rubrique Cours en ligne. Topographie, Topométrie, SIG et Photogrammétrie.
- [GRU06] Grussenmeyer, P., Alby, E., Meyer, E., Rampazzo, M., (2006).
3D building model as an interface for a Web Information System. Case study of the Pontonniers high school in Strasbourg. ISPRS Comm. V Symposium, Dresden, Sept. 25-27, Germany. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, 6 pages.
- [GUI02]. Guin-Duclosson N., Nova N. (2002)
Utiliser des connaissances abstraites ou contextualisées pour proposer différents types d'aide. Technologies de l'Information et de la Communication dans les Enseignements d'ingénieurs et dans l'industrie, TICE'2002, Lyon, 13-15 novembre 2002, p. 133-139.
- [HAN02] Hanrot, S. (2002)
A la recherche de l'architecture : essai d'épistémologie de la discipline et de la recherche architecturales. Paris : L'Harmattan 2002
- [HEG03] Hegron, G., (2003)
De la modélisation à la conception assistée par ordinateur : La modélisation déclarative. Annales des Ponts et Chaussées. 2003. 107-108, pp. 19-26.
- [HEU02] Heuvel, F.A. (van den), (2002)
Towards automatic relative orientation for architectural photogrammetry. P. Patias (Editor). International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 34 part 5, Corfu, Greece, pp. 227-232. 2002
- [HEU03] Heuvel, F.A. (van den). (2003)
Semi-automatic camera calibration and image orientation using the CIPA reference data set. In XIXth CIPA International Symposium, Antalya, Turkey. Sept. 30th. Oct 4th, 2003. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXIV-5/C15 ISSN 1682-1750
- [HEU99] Heuvel F.A. (van den). (1999)
Estimation of interior orientation parameters from constraints on line measurements in a single image. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 5W11, pp. 81-88. 1999.
- [HOL04] Hollander (d'), R. (2004)
Topographie. Article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique.

[ICO78] Statuts de L'ICOMOS.

Adoptés à Moscou par la Vème Assemblée Générale de l'ICOMOS le 22 mai 1978.

Dernière consultation 5 septembre 2006.

http://www.international.icomos.org/statuts_fra.htm.

[IEN02] Université Friedrich Schiller d'Iéna. Iéna. Allemagne.

Dernière consultation : 4 septembre 2006.

Site : www.geogr.uni-jena.de/236.0.html

[ISP00] Statuts de l'ISPRS. Révision 2000.

Dernière consultation 11 avril 2006.

site : http://www.isprs.org/documents/statutes_and_bylaws2000_f.html

[IUL05] Iuliano, L. Minetola, P. (2005)

Rapid manufacturing of sculptures replicas : a comparison between 3D optical scanners. In XXth CIPA International Symposium, Turin, Italie. Sept. 26th. Oct 1st, 2005. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXVI-5/C34 ISSN 1682-1750 & CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XX-2005 ISSN 0256-1840.

[KAD04] Kadi, H. (2004)

Du modèle architectural au modèle géométrique. Modélisation de colonnettes khmères à partir de nuages de points. Mémoire de DEA MSEB, MAP-CRAI, Nancy.

[KLT06] Site de KLT associates ; Fabricant de logiciel de photogrammétrie.

Dernière consultation 5 septembre 2006.

Site : <http://www.kltassoc.com/>

[LAR92] D. Laroche. (1992)

La Tholos de Delphes : forme et destination, Actes du Colloque, Strasbourg, p. 207-223.

[LEN04] Leniaud, J.-M. (2004)

Le Patrimoine. Article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique.

[LUC02] LUCA (DE), L. (2002)

Modélisation et Conception des Processus Assistés par Ordinateur Proposition d'une approche pour l'introduction des connaissances dans la chaîne Relevé-Modélisation-Représentation. Mémoire de DEA. MCAO, MAP-GAMSAU 2002.

[LUC06] LUCA (DE) L. (2006)

Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural : définition d'une approche hybride de reconstruction 3D d'édifices. Thèse de Doctorat. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Aix-en-provence. 31 mars 2006.

[MAR02] Marbs, A. (2002)

Experiences with laser scanning at i3mainz. CIPA, Heritage Documentation. International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording. Corfu, Greece. 2002

[MAX06] Logiciel 3Ds Max, racheté par Autodesk (avant la rédaction de la thèse)
Dernière consultation 5 septembre 2006.
site : <http://www.autodesk.fr/adsk/servlet/index?siteID=458335&id=5682746>

[MAY06] Logiciel Maya, racheté par Autodesk (durant la rédaction de la thèse)
Dernière consultation 5 septembre 2006.
Site : <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/index?siteID=123112&id=7635018>

[MEY03] Meyer, E. (2003)
Modélisation photogrammétrique de l'épigraphie des colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak. Mémoire de DEA MAP-CRAI, Nancy.

[MON05] Montia, C. Brumana, R. Achillea, C. (2005)
An interdisciplinary research and site as a university teaching laboratory : the continuous works of the basilica of san lorenzo in milan. In XXth CIPA International Symposium, Turin, Italie. Sept. 26th. Oct 1st, 2005. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXVI-5/C34 ISSN 1682-1750 & CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XX-2005 ISSN 0256-1840.

[MON06] site internet du Centre des Monuments Nationaux
Dernière consultation 14 avril 2006.
Site : www.monum.fr.

[MOU04] N., Mouloud. (2004)
Modèle. Article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique.

[PAT04] Patias, P. (2004)
35 Years of Cipa. XXème Congrès de l'ISPRS : Geo-Imagery Bridging Continents. 12-23 Juillet 2004. Istanbul, Turquie. pp 665-670

[PER04] Perdrizet, F. (2004)
Méthode pour l'acquisition, l'organisation et l'exploitation des images texturant des bâtiments modélisés en 3D. Revue de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection n°173/174 (2004-1/2) pp 16-25.

[PER93] J.M., Pérouse de Montclos. (1993)
Principes d'analyse scientifiques, architecture, vocabulaire. Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France. Imprimerie nationale, Paris.

[PHO06] Photomodeler de EOS système.
Dernière consultation 6 septembre 2006.
Site : www.photomodeler.com

[POL00] Pollefeys, M. Koch, R. Vergauwen, M. Van Gool, L. (2000)
Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (55)4. pp. 251-267.

[POM04] Pomarède, V. (2004)
Conservation des œuvres d'art. Partie d'article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique.

[POR04] Porquet, D. (2004)

Rendu en temps réel de scènes complexes. Thèse de doctorat. Université de Limoges. 29 Novembre 2004

[RAB04] Rabbani, T. Heuvel (van den), F. A. (2004)

Methods for fitting CSG models to point clouds and their comparison. The 7th IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging, August 17-19, 2004, Kauai, Hawaii, USA . pp. 279 – 284

[REA06] RealWorks Survey de Trimble.

Dernière consultation 5 septembre 2005.

Site : <http://www.trimble.com/realworks.shtml>

[REM03] Remondino F. (2003)

From point cloud to surface : the modeling and visualization 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, Suisse.

[RIE84] Riegl, A. (1903)

Culte moderne des monuments. Seuil, Paris 1984. 122p

[RIE06] RIEGL, scanner laser terrestre.

Dernière consultation 7 septembre 2006.

Site : <http://www.riegl.com>

[RIN04] Ringenbach, N. (2004)

Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur Strasbourg. Strasbourg. 23 septembre 2004.

[ROB01] Le CD-ROM du Petit Robert.

Version électronique du Nouveau Petit Robert, 2001, dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française version 2.1

[RON05] Roncella, R. Forlani, G. (2005)

Photogrammetry and laser scanning : a metric reliability comparison. Workshop Italy - Canada. 3D Digital Imaging and Modeling: Applications of Heritage Industry Medicine and Land. 17 – 18 May 2005

[ROU95] Rousseau, J.-J.

Discours sur l'origine et les fondements de l'inégalité parmi les hommes. Flammarion, réédition Paris 1995.

[SAI92] J.-P., Saint-aubin. (1992)

Le relevé et la représentation de l'architecture. Inventaire Général des Monuments et des Richesses Artistiques de la France, Paris. 1992.

[SAI04] Saint-Aubin, J.-P. (2004)

Archéologie traitement du matériel : la photogrammétrie architecturale. Article de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique.

[SCA03] C. Scaletsky. (2003)

Rôle des références dans la conception initiale en architecture : Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture, le système « kaléidoscope ». Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. 17 Octobre 2003

[SGR05] Sgrenzaroli, M. (2005)

Cultural Heritage 3D reconstruction using high resolution laser scanner : new frontiers data processing. In XXth CIPA International Symposium, Turin, Italie. Sept. 26th. Oct 1st, 2005. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXVI-5/C34 ISSN 1682-1750 & CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XX-2005 ISSN 0256-1840.

[STR99] Streilein, A., Grussenmeyer, P., Hanke, K. (1999)

Zurich City Hall: A reference data set for digital close-range photogrammetry, Symposium International du CIPA, 3-6 Octobre 1999, Recife/Olinda – Brésil

[TID96] Tidafi, T. (1996)

Moyens pour la communication en architecture, Proposition de la modélisation d'actions pour la figuration architecturale. Thèse de doctorat. Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, octobre 1996. Bibliothèque nationale du Canada O-61 2-26744-X

[TUW00] site internet du laboratoire de recherche en lumière structurée de l'université technique de Vienne, Autriche.

Dernière consultation 4 septembre 2006.

Site : <http://www.prip.tuwien.ac.at/Research/3DVision/struct.html>

[UNE04] Projet de l'unesco sur l'interaction Europe-Afrique. « La ville : réseau des cultures entre Yaoundé (Cameroun) et Strasbourg », 2004.

Dernière consultation 5 septembre 2006

Site : <http://portal.unesco.org>

[UNE46] La Convention (Acte Constitutif) créant l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO). Ratifié en 1946.

[UNI04] Dictionnaire de l'Encyclopædia Universalis 2004, version numérique.

[VIE96] Introduction to photogrammetry. Site de l'université de Vienne.

Dernière consultation : 17 avril 2006.

Site : <http://www.univie.ac.at/Luftbildarchiv/wgv/intro.htm>

[VIG92] J., Vigan (de). (1992)

Dicobat: dictionnaire général du bâtiment, Editions Arcature, Ris-orangis. 1992.

[VIO67] E. E., Viollet-le-Duc. (1868)

Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle.F. De Nobelet, Paris 1967.

[VIT96] Vitruve, Les dix livres d'architecture, traduction de Claude Perrault, 1673, Bibliothèque de l'image, 1996.

[WAL94] Waldhäusl, P., Ogleby, C. (1994)
3-by-3- Rules for Simple Photogrammetric Documentation of Architecture. In:
J.G.Fryer (Editeur): Close Range Techniques and Machine Vision. Proceedings du
Symposium de la Commission V de l'ISPRS à Melbourne, Australie, 1-4 Mars 1994.

[WEI04] Weinand, Y. (2004)
New modeling : projeter ensemble. Presses polytechniques et universitaires
romandes.

[ZIS00] Zischinsky, T. Dorffner, L. Rottensteiner, F. (2000)
Application of a new model helicopter system in architectural photogrammetry.
IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam.

Liste des figures

Figure 1	: stéréorestitution d'une façade du château du Lichtenberg (Alsace du nord) Avant restauration (1992) [GRU00]	25
Figure 2	: la documentation dimensionnelle permet la construction d'un modèle tridimensionnel	30
Figure 3	: prise en compte des connaissances architecturales	31
Figure 4	: prise en main du logiciel Photomodeler avec le jeu de données de l'hôtel de ville de Zurich, Suisse du CIPA [STR99]	35
Figure 5	: modèle tridimensionnel de la rue de l'Argonne à Strasbourg	36
Figure 6	: influence des projets de modélisation sur la recherche	37
Figure 7	: mesure de la hauteur d'une pyramide à distance par comparaison avec l'ombre d'un objet	59
Figure 8	: dispositif de prise de vue de Meydenbauer d'après [ALB01]	60
Figure 9	: base photogrammétrique d'après [GRU02]	62
Figure 10	: stéréoscope, principe et application [SAI92]	62
Figure 11	: stéréocomparateur de Carl Pulfrich d'après [GRU04]	63
Figure 12	: repères de fond de chambre imprimés sur la photographie lors de la prise de vue	65
Figure 13	: stéréorestituteur analytique Zeiss Planicomp P33 D'après [IEN02]	66
Figure 14	: interface de Photomodeler	69
Figure 15	: photo rectifiée d'après [GRU02]	70
Figure 16	: orientation automatique par reconnaissance de lignes d'après [HEU99]	76
Figure 17	: orientation automatique par association de zones communes d'après [POL00]	78
Figure 18	: principe de la triangulation laser d'après [BOE01]	81
Figure 19	: principe du laser à temps de vol d'après [BOE01]	83
Figure 20	: nuage de points	84
Figure 21	: consolidation de deux nuages de points	86
Figure 22	: segmentation d'un nuage de points	88
Figure 23	: nuage de points et maillage d'après [MON05]	91
Figure 24	: nuage de points avec et sans les couleurs de l'objet	92
Figure 25	: projection de motifs sur un objet à relever d'après [TUW00]	93
Figure 26	: le château d'eau de la promenade du Peyrou à Montpellier	96
Figure 27	: nuage de points du château d'eau	97
Figure 28	: restitution du château d'eau	98
Figure 29	: la documentation : fabrication et complémentation	114
Figure 30	: utilisation et enrichissement de la documentation architecturale	116
Figure 31	: différents types de documentation écrite traitant d'architecture	119
Figure 32	: la vue comme élément central à la représentation de l'architecture	121
Figure 33	: exploitation d'une représentation d'ouvrage bâti	123
Figure 34	: ouvrage bâti, rapport à la modélisation et à la représentation	126
Figure 35	: pistes de modélisation d'un objet réel	129
Figure 36	: modélisation impérative	136
Figure 37	: modélisation déclarative	137
Figure 38	: modélisation fonctionnelle	138
Figure 39	: modèle géométrique relationnel	140
Figure 40	: modèle géométrique dimensionnel	141

Figure 41	:	processus par étapes	142
Figure 42	:	ouvrage utilisé pour l'expérimentation : le musée zoologique de Strasbourg	161
Figure 43	:	une face correspond à une façade principale	162
Figure 44	:	mise en place de la volumétrie	163
Figure 45	:	insertion des ouvertures	165
Figure 46	:	définition des transitions	167
Figure 47	:	mise en place des détails	167
Figure 48	:	description sémantique de l'architecture à deux niveaux de détail différents: exemple d'un mur de soubassement de la promenade du Peyrou à Montpellier	173
Figure 49	:	la baie et ses encadrements, illustration du Dicobat [VIG92]	174
Figure 50	:	la baie, illustration issue de Principes d'analyse scientifiques, architecture, vocabulaire [PER93]	175
Figure 51	:	extrait d'un arbre hiérarchique sémantique modélisant une façade d'ouvrage	176
Figure 52	:	représentation d'ouvrage en deux dimensions : plan coupe et façade (dessin anonyme, collection particulière) [PER93]	177
Figure 53	:	maquette partielle d'un ouvrage [PER93]	178
Figure 54	:	représentation tridimensionnelle au format VRML de la promenade du Peyrou à Montpellier [ALB04]	179
Figure 55	:	nuage de point d'un angle du château du Peyrou, Montpellier [ALB04]	180
Figure 56	:	interaction entre architecture et topographie	181
Figure 57	:	méthode analogique de mise en place du processus de modélisation	182
Figure 58	:	définition de la géométrie antérieure au dimensionnement	182
Figure 59	:	la base de données comme instrument de synthèse	184
Figure 60	:	le point comme sommet de face ou comme lieu géométrique	190
Figure 61	:	le plan permet de mettre en relation un jeu de données segmenté avec les faces correspondantes	191
Figure 62	:	utilisation de l'ortho-photo préexistante comme aide au découpage des façades	194
Figure 63	:	données photogrammétriques du projet des Pontonniers	195
Figure 64	:	nuage de points de l'ensemble des bâtiments du lycée des Pontonniers de Strasbourg	195
Figure 65	:	les trois types de définition de points	196
Figure 66	:	interaction entre la formalisation du modèle et son dimensionnement	198
Figure 67	:	procédure de dessin	199
Figure 68	:	décomposition des actions de dessin d'une fenêtre	201
Figure 69	:	exemple d'effet de la réutilisation d'un dessin et d'une procédure correspondante	202
Figure 70	:	schématisation de la première étape du processus	204
Figure 71	:	division de face et hiérarchie	205
Figure 72	:	décrochement d'une face par rapport à d'autres	206
Figure 73	:	procédure d'insertion d'une baie dans une face provenant de la deuxième étape	208

Figure 74	: chapiteau corinthien Planche réalisée d'après les descriptions de Vitruve [VIT96].	211
Figure 75	: construction des sous éléments du modèle	212
Figure 76	: le modèle final après assemblage	212
Figure 77	: association de moulures et de répétitions	213
Figure 78	: entablement modélisé	213
Figure 79	: outils de composition d'une colonnette khmère	214
Figure 80	: scanner LMS-Z420i de RIEGL	222
Figure 81	: combinaison pour l'acquisition des données	225
Figure 82	: traçabilité des transformations et hiérarchie dans la base de données, extrait de la table des faces	232
Figure 83	: table des points dans Photomodeler	234

Annexe A :

Projets au PAGE

Hôtel de ville de Zurich

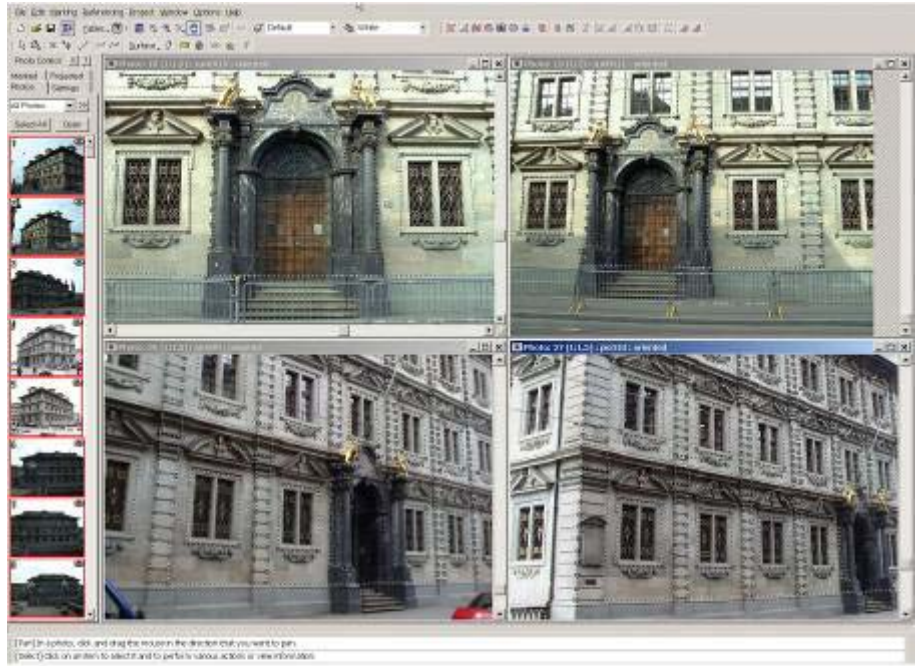


L'hôtel de ville de Zurich est positionné de manière idéale d'un point de vue photogramétrique, un bâtiment dont le contexte offre un recul suffisant.

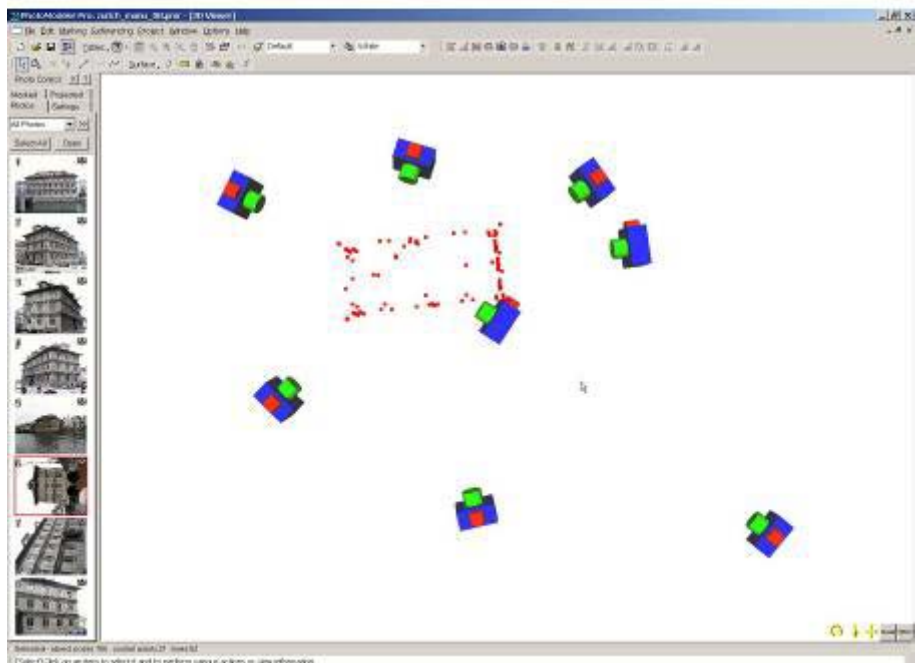


Le recul imposé par le cours d'eau limite la précision des images

Interface du logiciel
Photomodeler



Les positions de
prise de vue par
rapport au
bâtiment.





L'hôtel de ville vu depuis la berge.



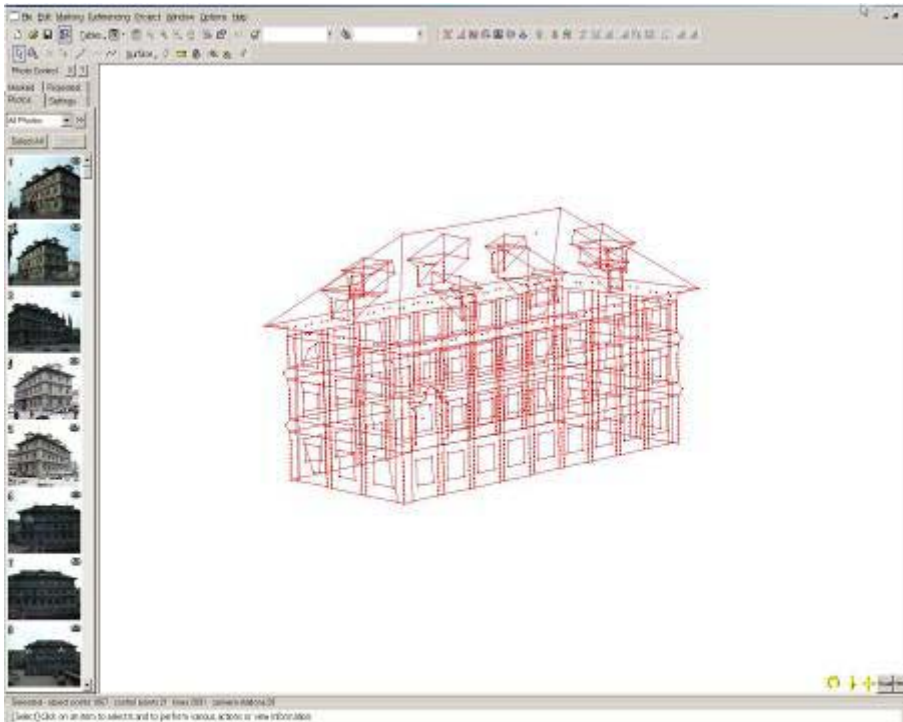
Vu depuis le carrefour.

Vu depuis le quai

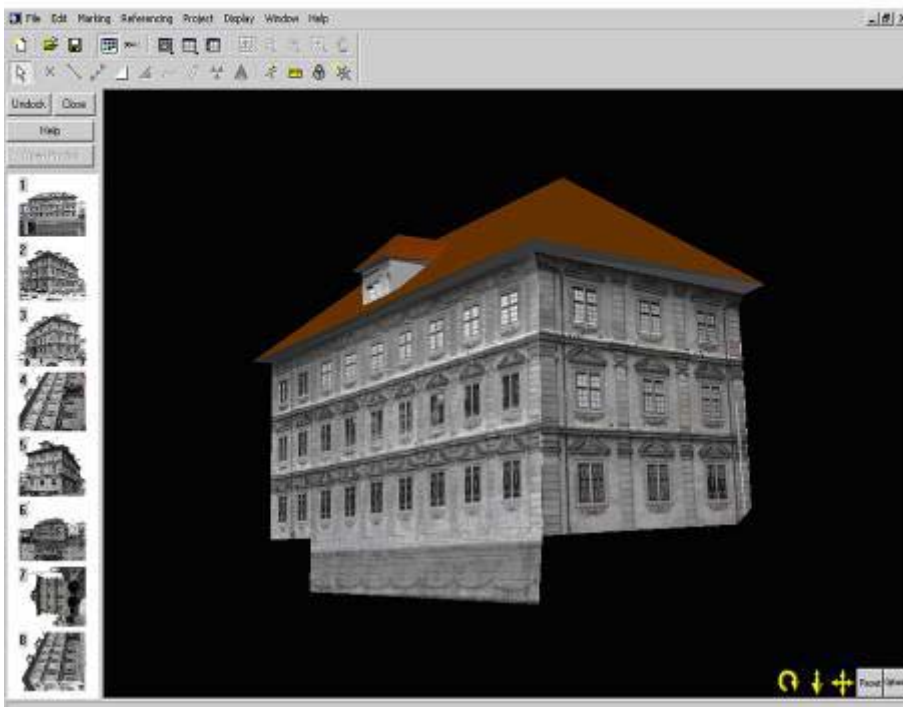


Vu depuis le pont





Représentation tridimensionnelle filaire



Modèle surfacique avec placage de texture dans le module proposé par Photomodeler.

Rue de l'Argonne

La rue de l'Argonne
se situe à
Strasbourg, derrière
l'université



La rue est composée
par des bâtiments
étéroclites dont la
faculté de géographie
dont le bâtiment date
des années soixante.





Le canyon urbain que constitue la rue est assez étroit par rapport à la hauteur des façades.

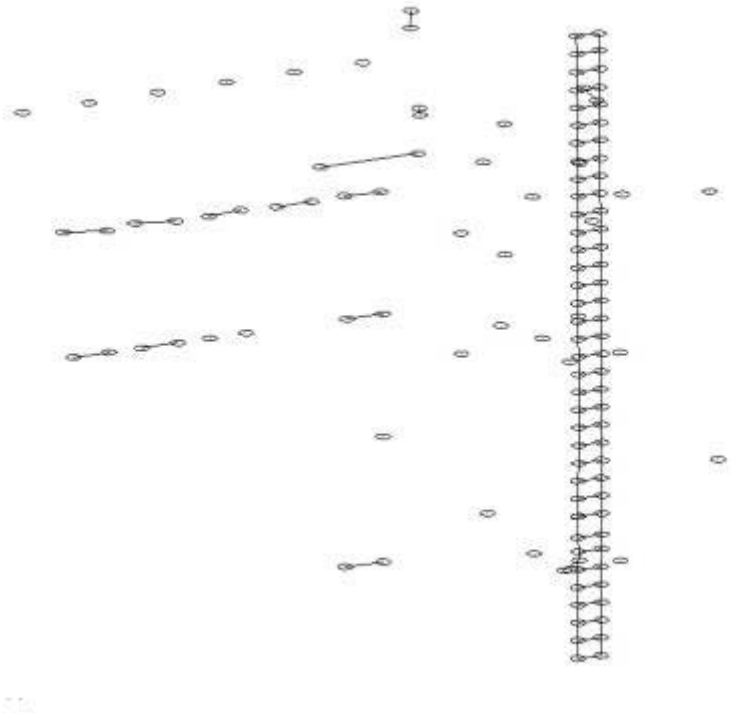


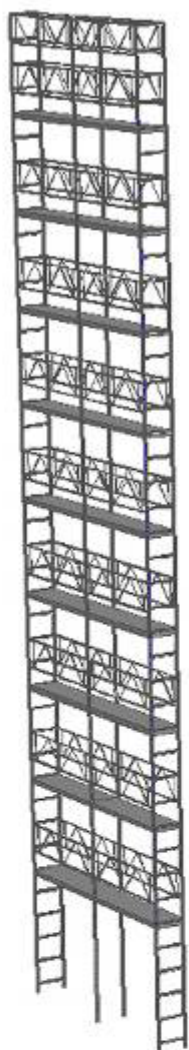
Les capteurs météorologiques, qui vont permettre la modélisation du rayonnement solaire, sont disposés sur l'échafaudage dont il faudra restituer les positions dans le modèle tridimensionnel.

Les capteurs vus du dessus

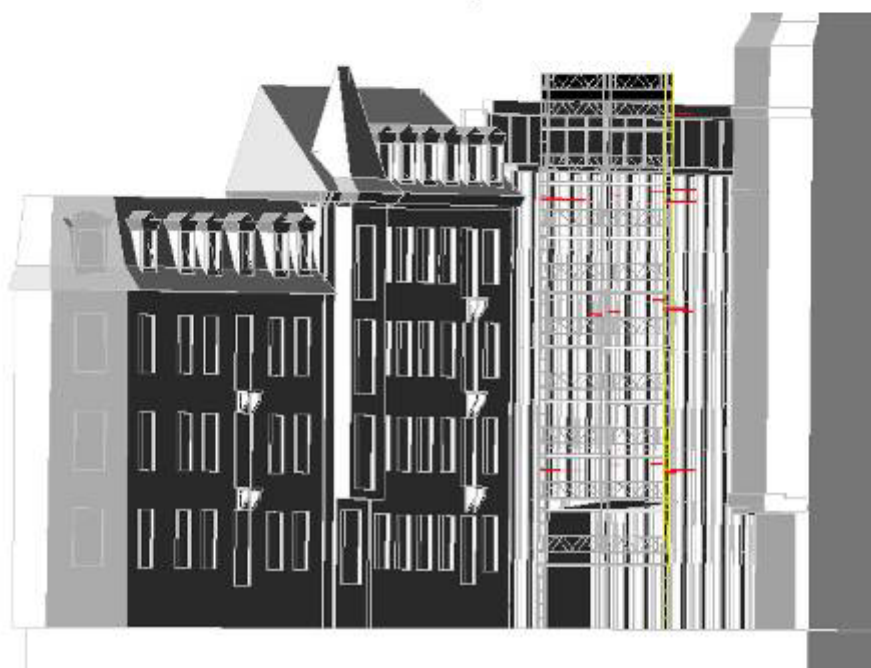


Mesure de l'échafaudage et de la position des capteurs





Modèle de
l'échafaudage



Modèle de la rue
intégrant
l'échafaudage.

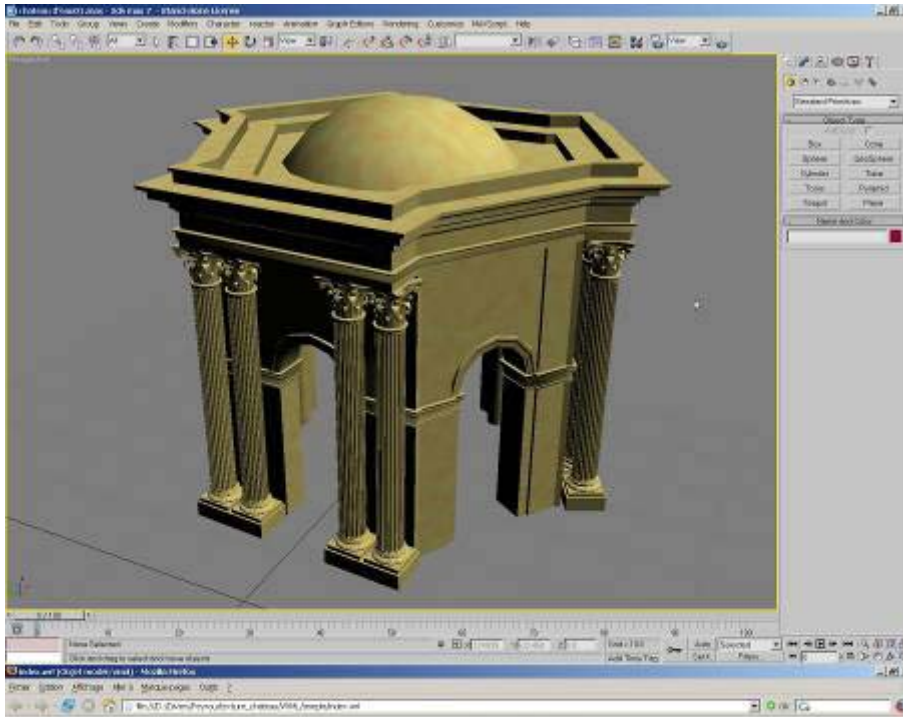
Promenade du Peyrou

La promenade du
Peyrou de
Montpellier se situe
à l' limite du centre
ancien de la ville



Vue d'ensemble





Le château d'eau a été scanné et modélisé d'après le nuage de points.



Modèle VrmI simplifié pour les points de vues éloignés



Modèle VRML détaillé pour les vues rapprochées



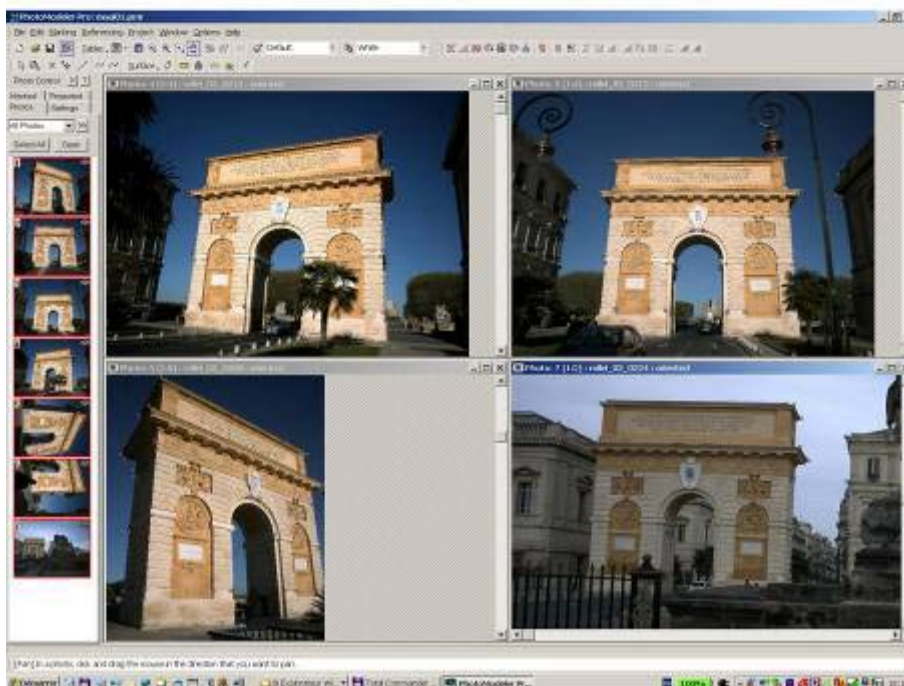
Les éléments de mobilier urbain participent au réalisme de la scène finale. Une phase d'idéalisation permet de simplifier le modèle final et de le décomposer en primitives simples



Arc de Triomphe :

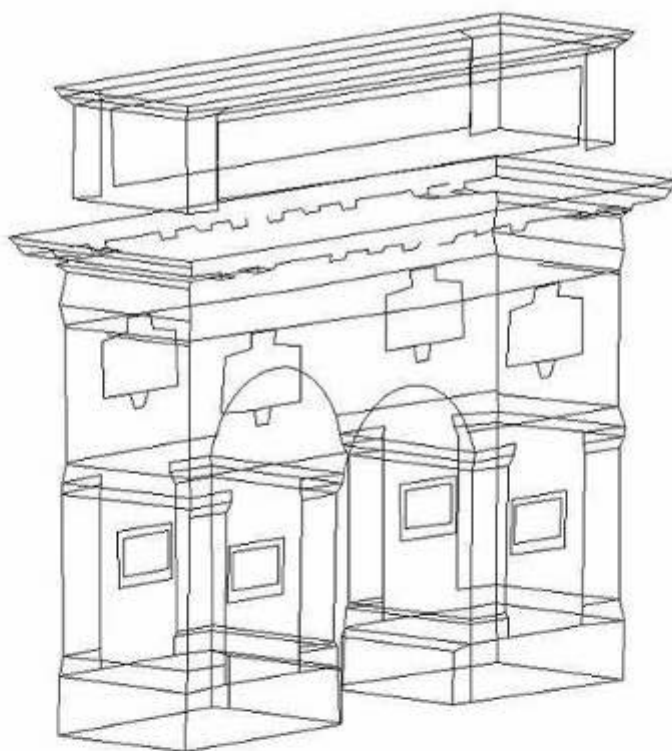


L'arc de triomphe est entre la promenade du peyrou et le centre ancien de Montpellier.

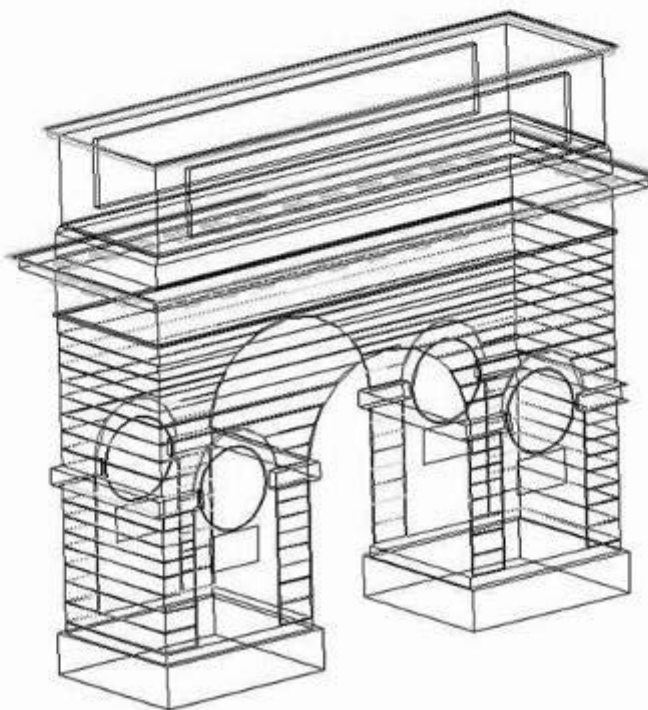


C'est un projet de modèle qui a été donné à des étudiants, pour l'apprentissage de Photomodeller et des possibilité de modélisation à partir des données

Rendu Filaire

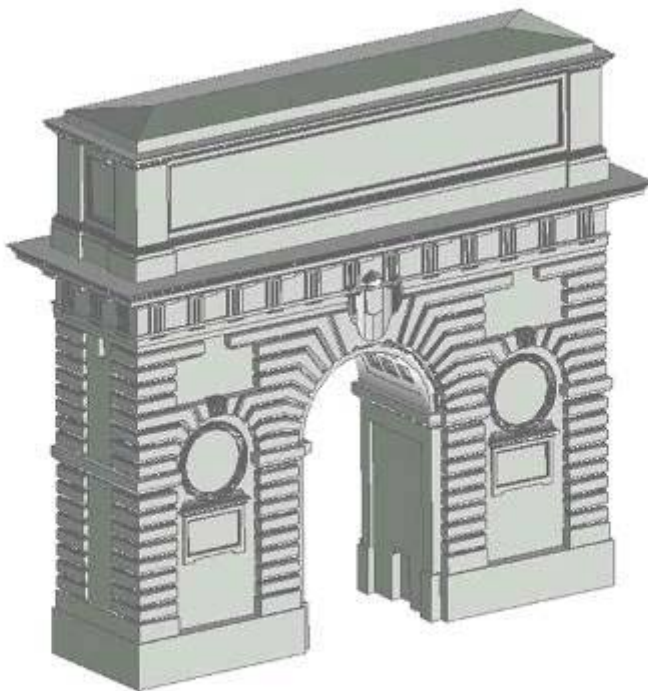


Rendu filaire idéalisé





Modèle texturé



Modèle
géométrique très
détaillé

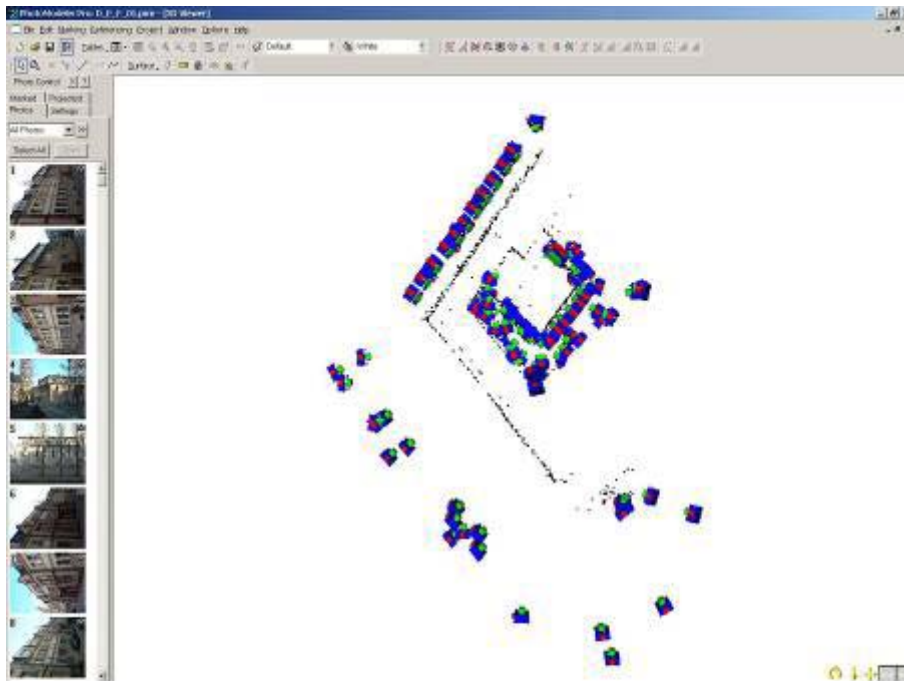
Lycée des Pontonniers

Le Lycée des Pontonniers est situé au bord du canal des faux remparts à Strasbourg

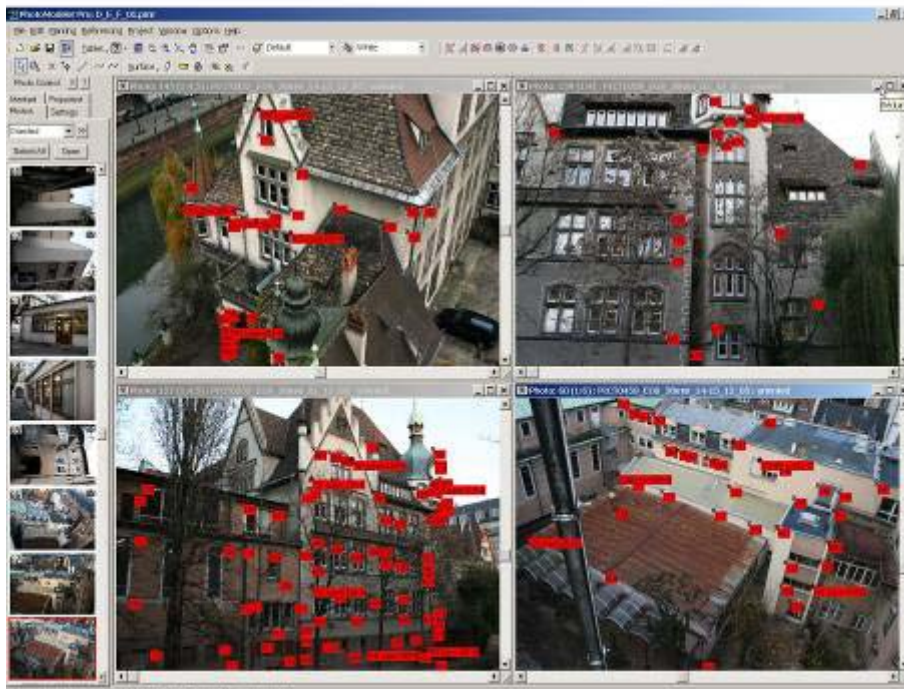


Il est composé de plusieurs bâtiments entourant deux cours

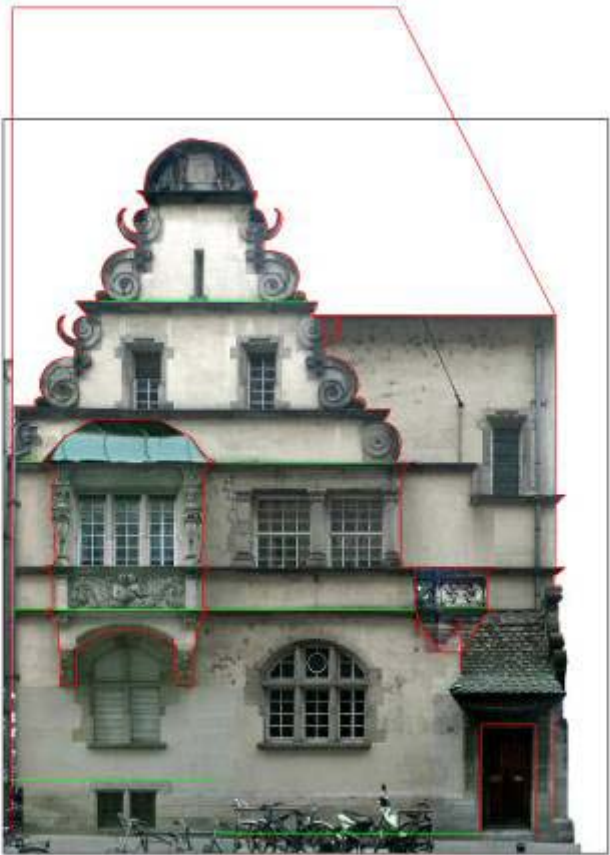
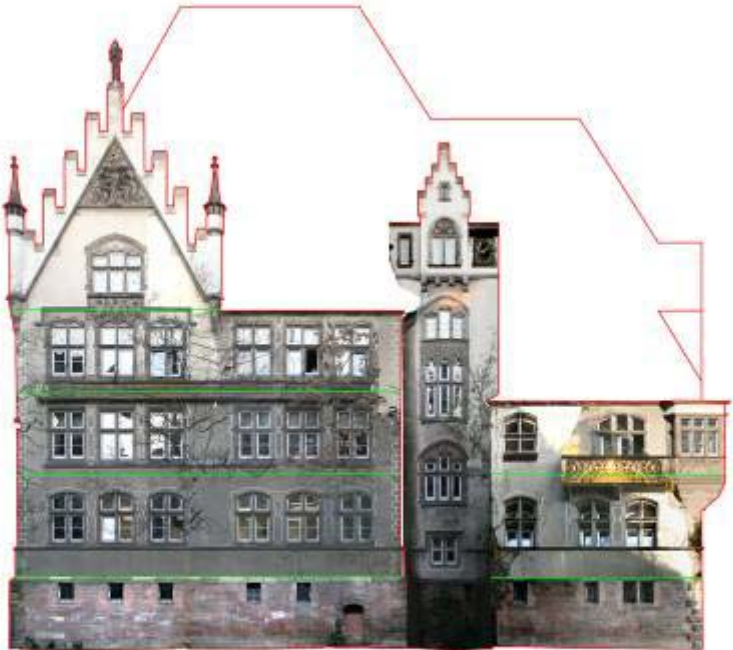


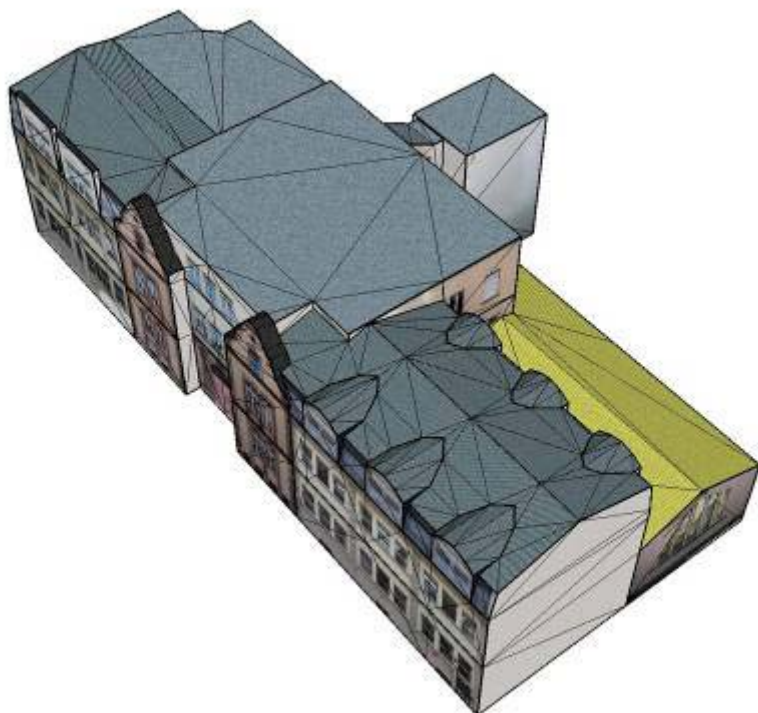


Le projet a été réalisé à l'aide de données photogrammétriques

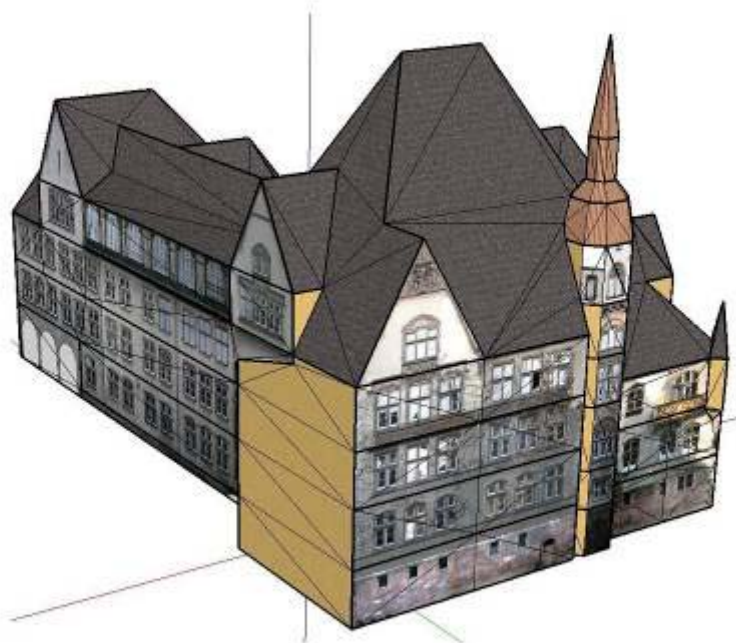


Des ortho photos
ont été réalisées

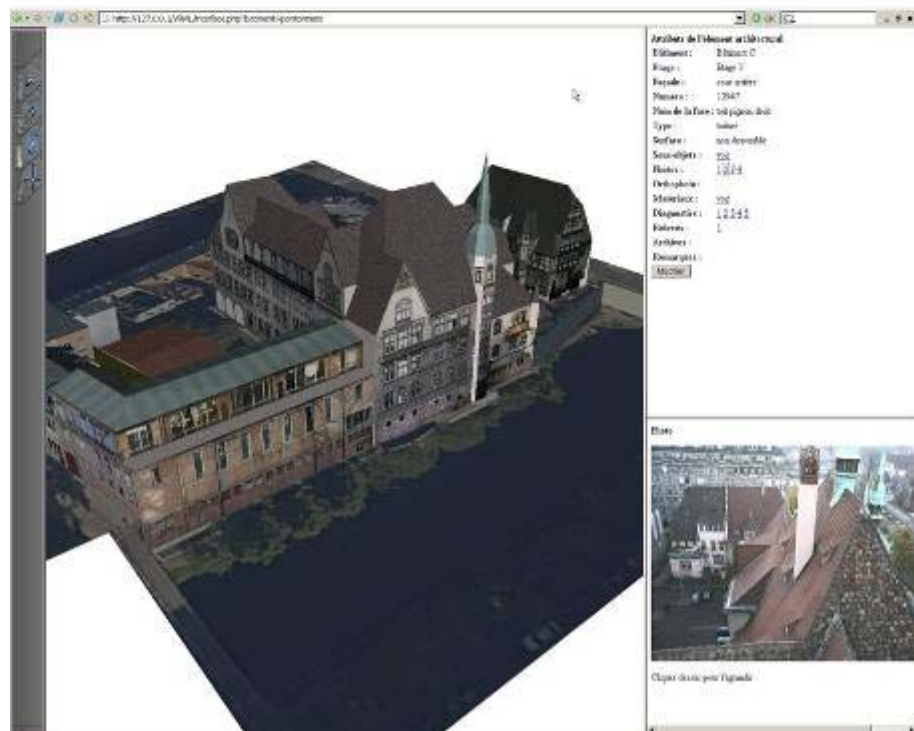
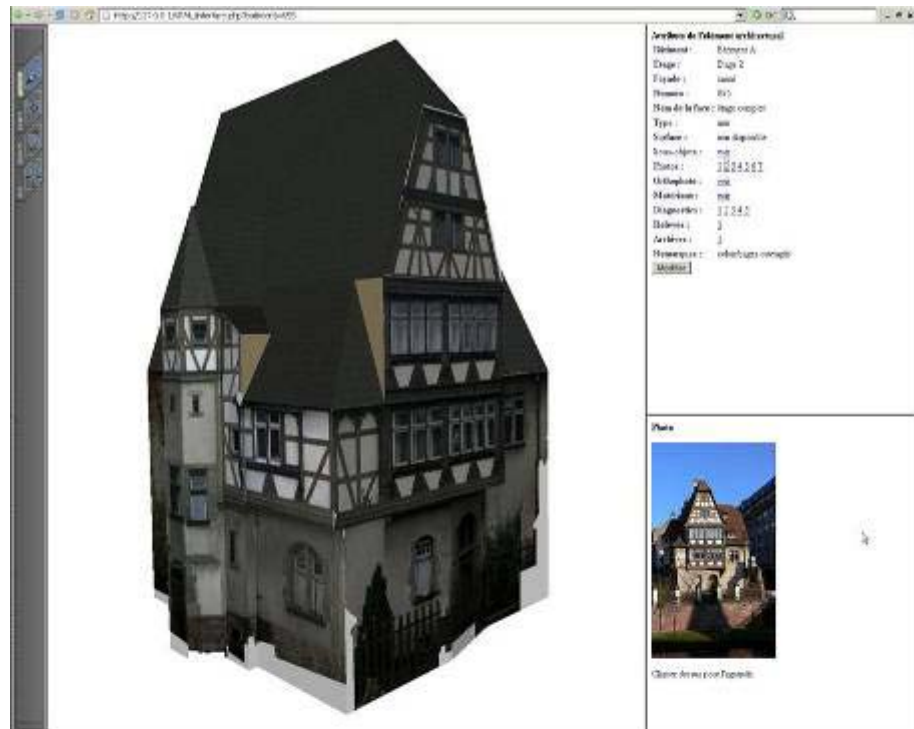




Les modèles ont
été réalisés dans
Sketchup



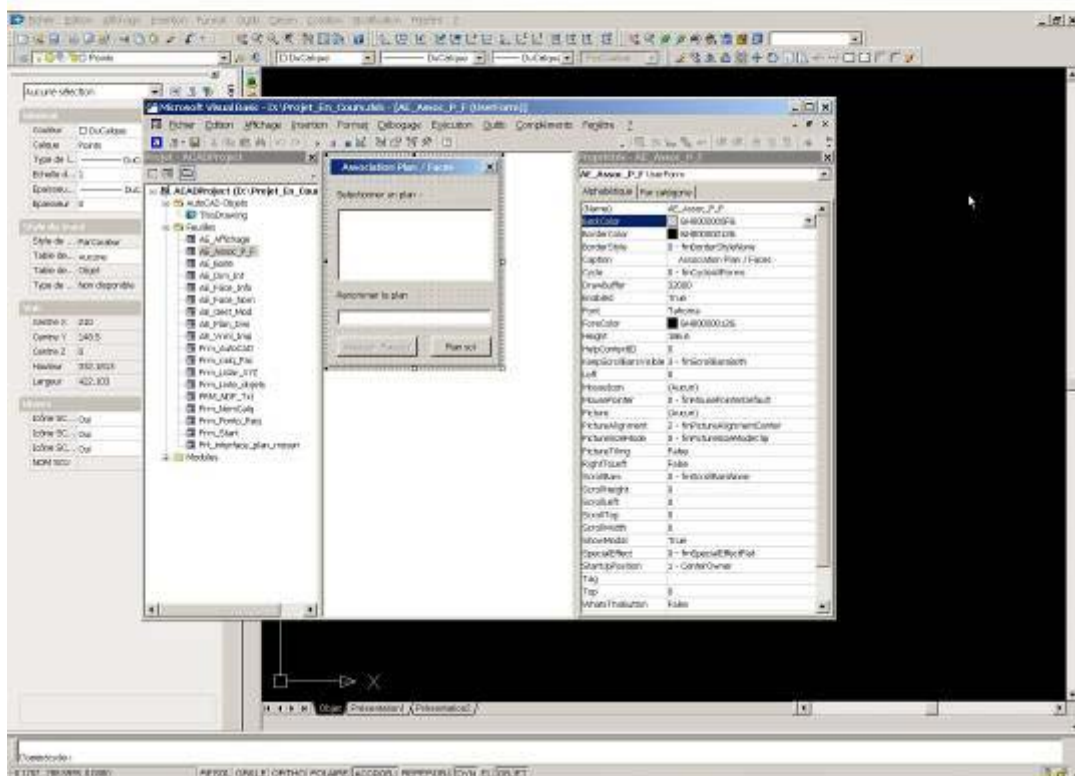
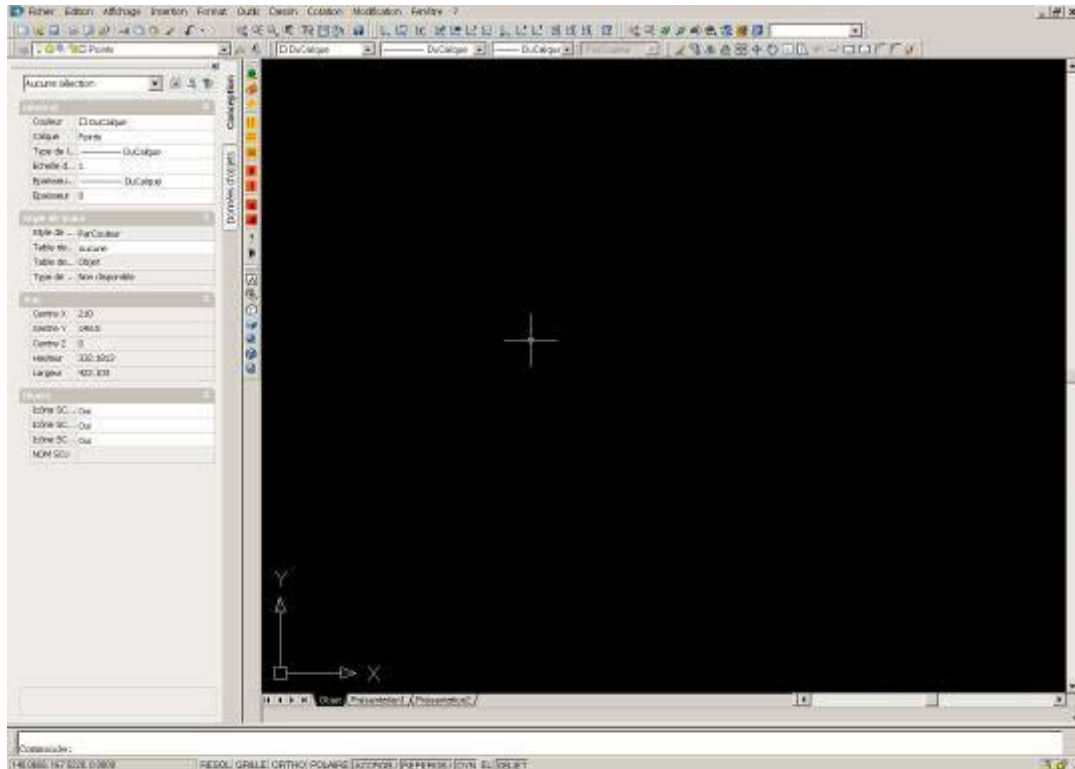
Une interface de gestion des modèles permet de mettre en relation Idivers documents concernant les bâtiments



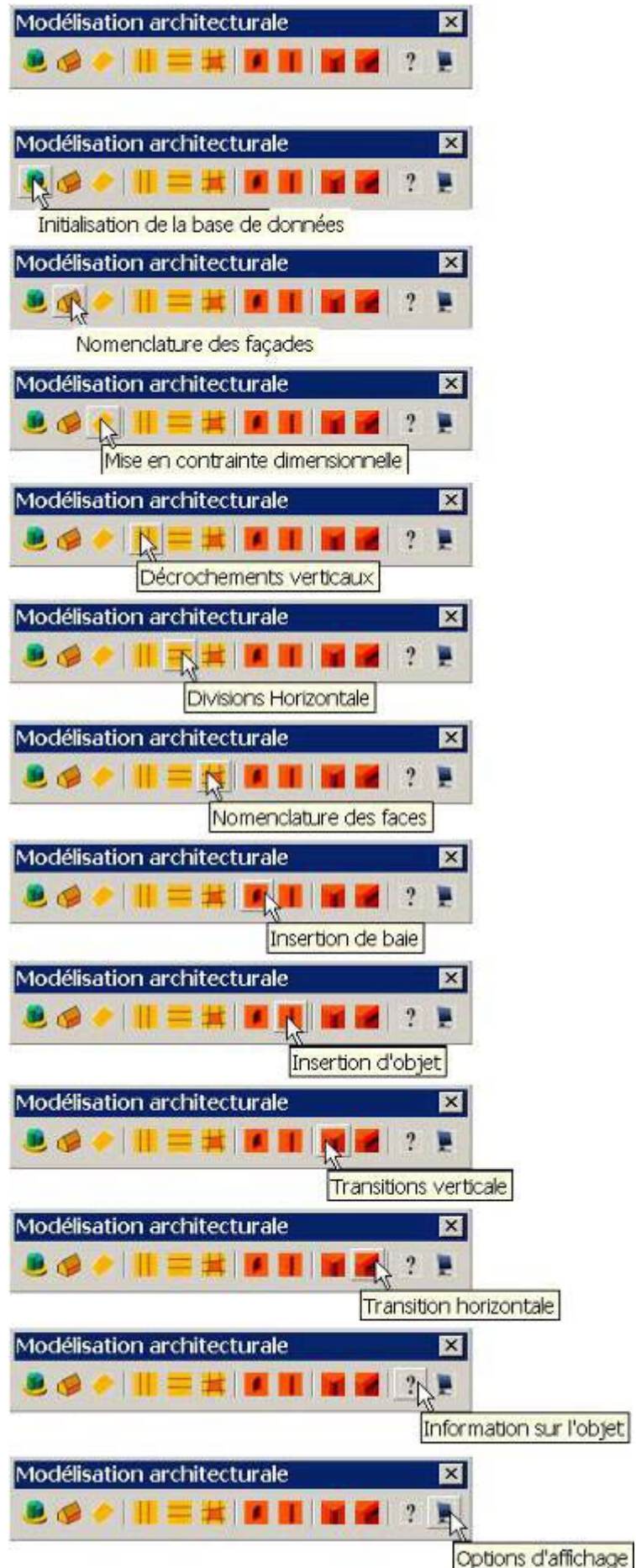
Annexe B :

Présentation de l'Interface

AutoCAD est un logiciel de dessin dans lequel on peut insérer des fonctions et boutons personnalisés. Ceci est possible grâce à l'interface Visual Basic pour Applications.

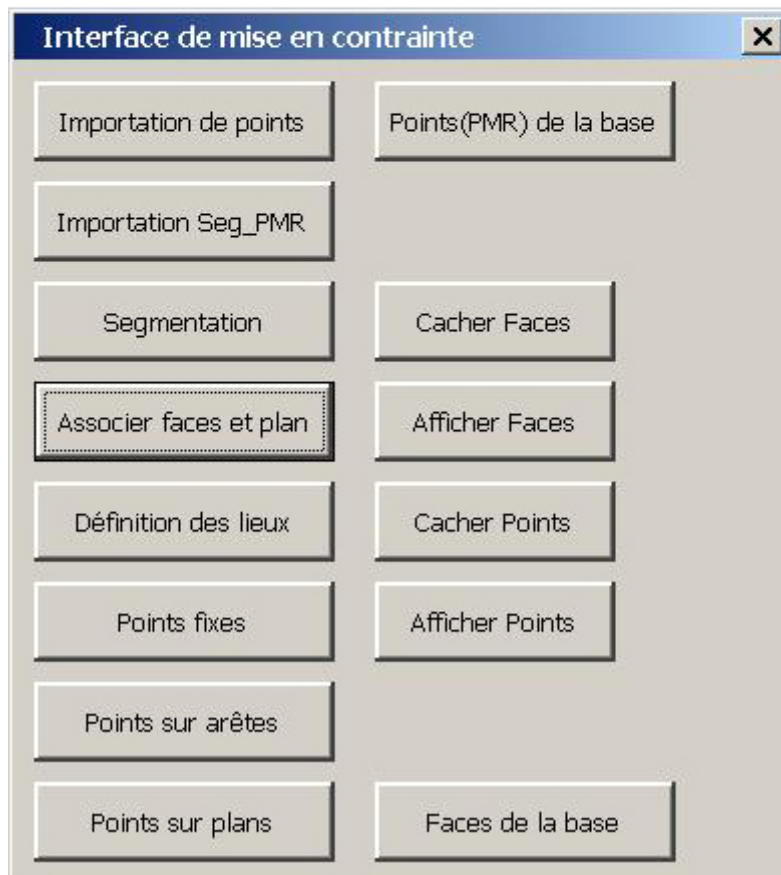


Les éléments implémentés sont visibles dans l'interface d'AutoCAD par le biais d'une barre d'outils où on peut avoir accès aux fonctions principales





Lorsqu'on ouvre un projet, c'est la base de données qui contient toutes les informations qu'il faut charger ou créer

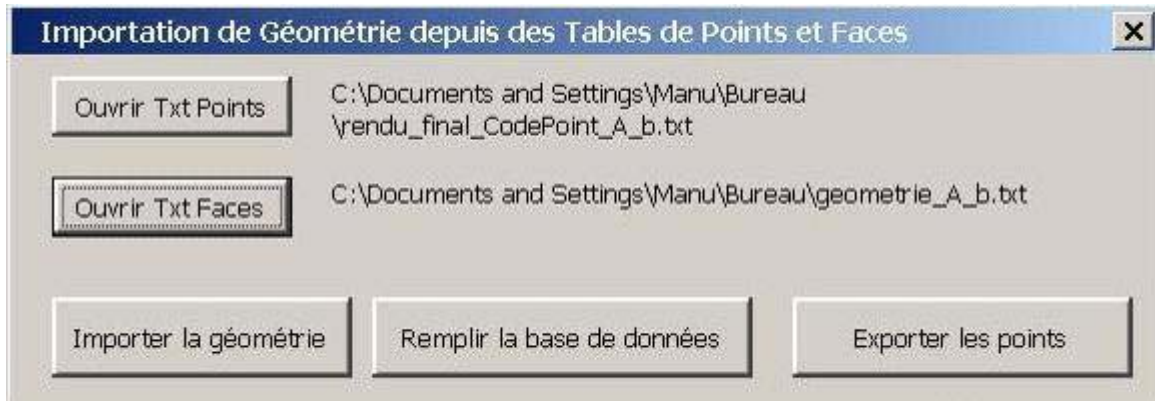


L'interface de mise en contrainte permet de faire la relation entre les éléments modélisés et les données dimensionnelles.

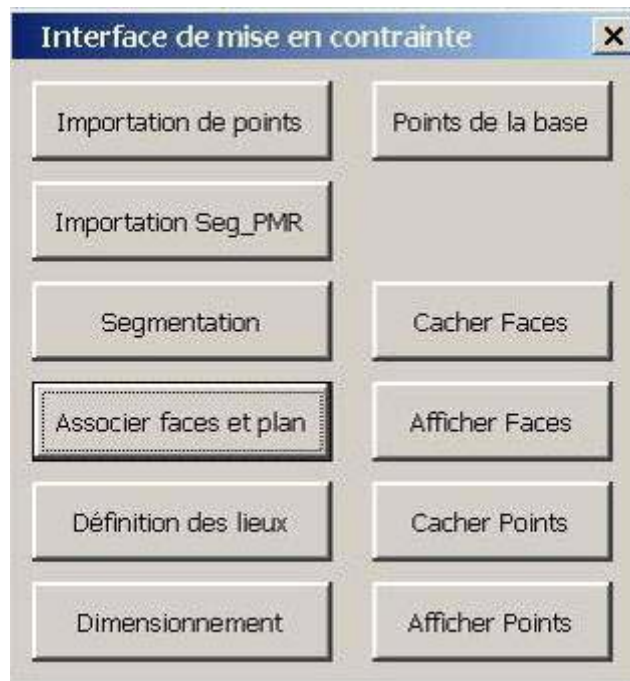
Annexe C :

Adaptation du processus au projet des Pontonniers.

La modélisation étant réalisée dans Sketchup pour des soucis d'ergonomie et de plaquage de texture, on a besoin d'une interface d'importation / exportation du modèle. On récupère deux tables depuis la base de la région (mySQL / PHP) et on les introduit dans la base de l'interface.

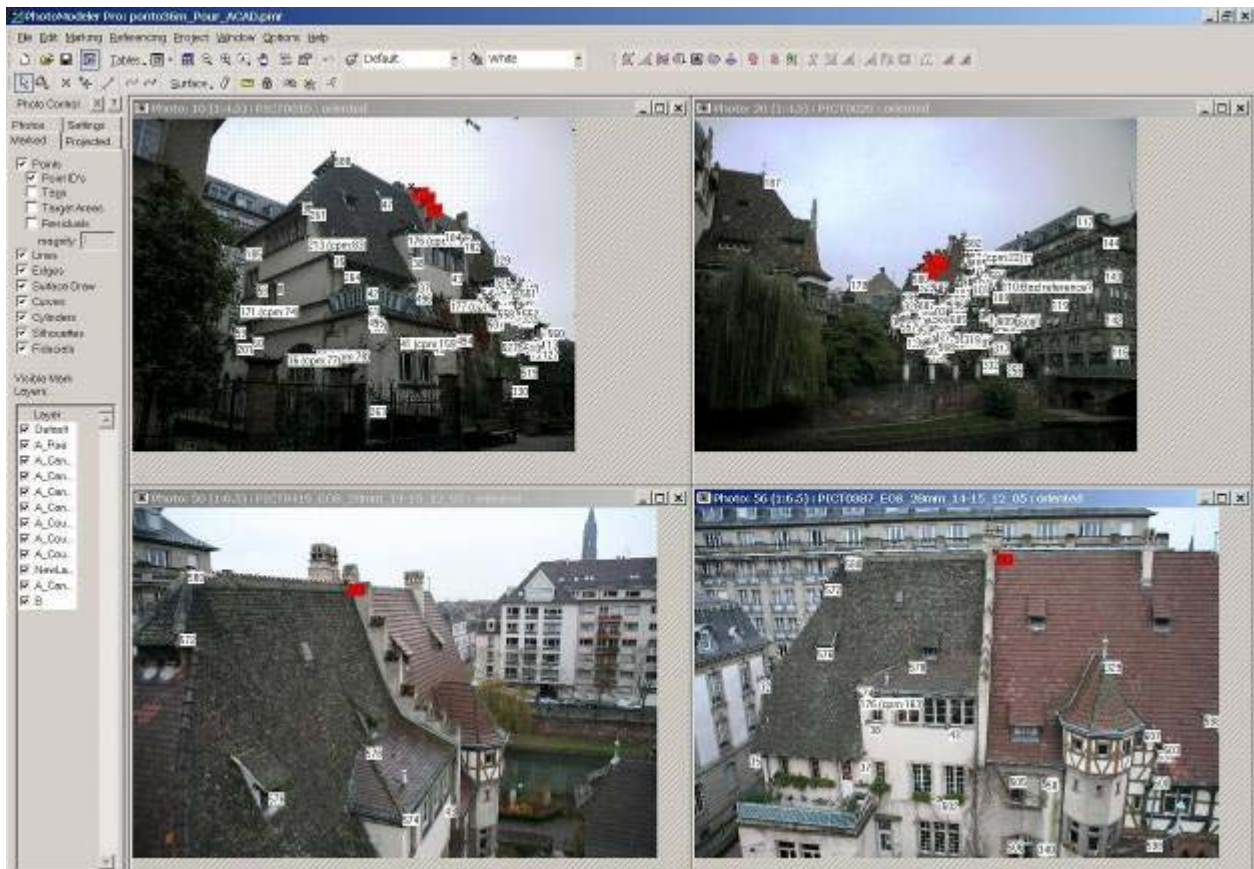
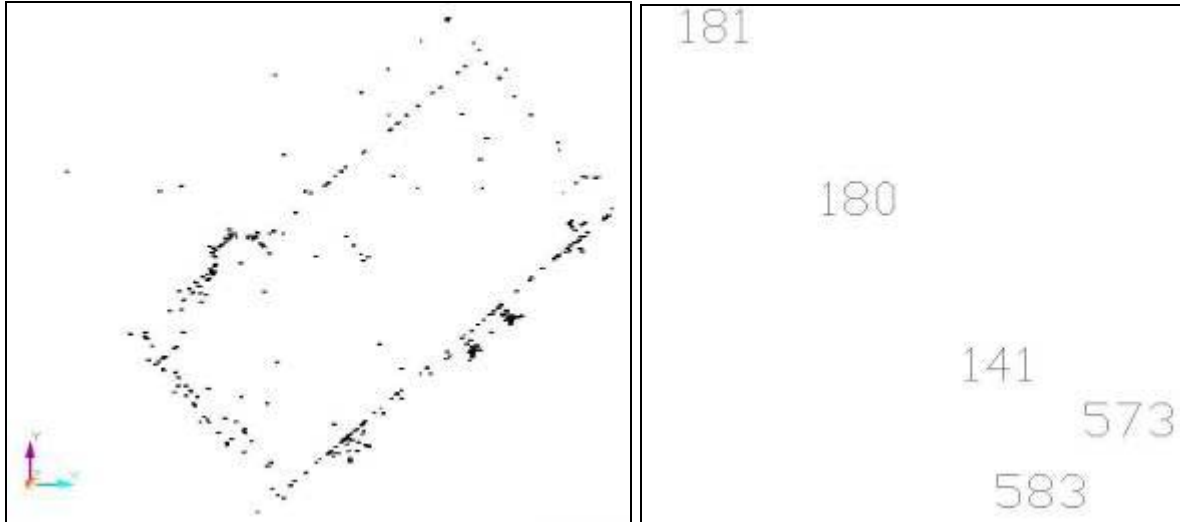


Interface de mise en contrainte



Importation de points :

Récupération des points de Photomodeler et affichage dans le dessin d'objets texte pour garder une relation entre les points.



Points de la base :

Charger les points s'ils sont dans la base (Avec nomenclature de calque s'il y a). On a ainsi le nuage de points dans l'interface.

Segmentation :

Pour dimensionner les faces du modèle, on les associe à des plans de référence définis directement par les points mesurés.

Pour créer les plans de référence, on choisit trois points PMR (Photomodeler) dans l'interface, de façon à ce que l'on puisse segmenter le nuage et mettre dans un calque tous les points de ce plan (on peut choisir une distance au plan). Le calque est nommé et le nom permet l'introduction de la sémantique dans le processus.

La segmentation peut se faire au fur et à mesure dans l'interface ou automatiquement par l'intermédiaire d'un classeur Excel. (Bouton « Importation Seg_PMR »)

	A	B	C	D	E	F	G
1	Chl_Bas_D	255	54	255			
2	Chl_Bas_G	569	333	354			
3	Chl_Bas_M	512	315	351			
4	Chl_Croise	582	107	50			
5	Chl_Ht	93	96	106			
6	Chl_Ht_Ret_D	582	520	597			
7	Chl_Ht_Ret_G	592	553	574			
8	Chl_Sous_To	199	609	612			
9	Chl_Toit_G	562	625	588			
10	Chl_Toit_I	504	585	110			
11	Cour_Bas_D	567	598	333			
12	Cour_Esc_D	514	551	555			
13	Cour_Esc_G	543	550	521			
14	Cour_Esc_M	550	551	514			
15	Cour_Esc_Re	542	545	529			
16	Cour_Esc_To	329	555	551			
17	Cour_Esc_To	329	550	513			
18	Cour_Esc_To	329	550	551			
19	Cour_Esc_To	329	180	555			
20	Cour_Esc_To	329	189	513			
21	Cour_Gauche	505	507	340			
22	Cour_H_D	145	113	583			
23	Cour_M_D	132	581	508			
24	Cour_Ret_D	565	586	598			
25	Cour_Ret_D	509	600	601			
26	Cour_Toit_Be	588	590	557			
27	Cour_Toit_Ht	582	585	588			
28	Cour_Toit_Re	607	602	603			
29	Vur_Vitoyen	613	619	182			
30	Rue	195	25	69			
31	Rue_Croise	367	385	558			
32	Rue_Croise	587	110	111			
33	Rue_Gour_Re	614	615	617			
34	Rue_Ret_D_T	583	387	613			
35	Rue_Ret_D_T	588	388	613			
36	Rue_Ret_G_T	584	585	111			
37	Rue_Toit	562	583	505			
38	Sous_Etage	597	317	320			
39							
40							
41							
42							
43							
44							

Associer Faces et Plans :

On récupère les calques de la segmentation et on associe les plans de référence aux faces du modèle.



Définition des lieux :

Première phase de calcul, on classe les points (lieux géométriques)

Par l'intermédiaire de l'association des faces aux plans de référence, on peut savoir par quels plans de références les points sont définis

Trois cas de figure :

Points défini par trois plans ou plus :

Points les mieux définis spécialement par intersection des plans. Ce sont des points fixes.

Points sur une arête (deux plans) :

Ces points sont définis par rapport à des points fixes appartenant à la même arête.

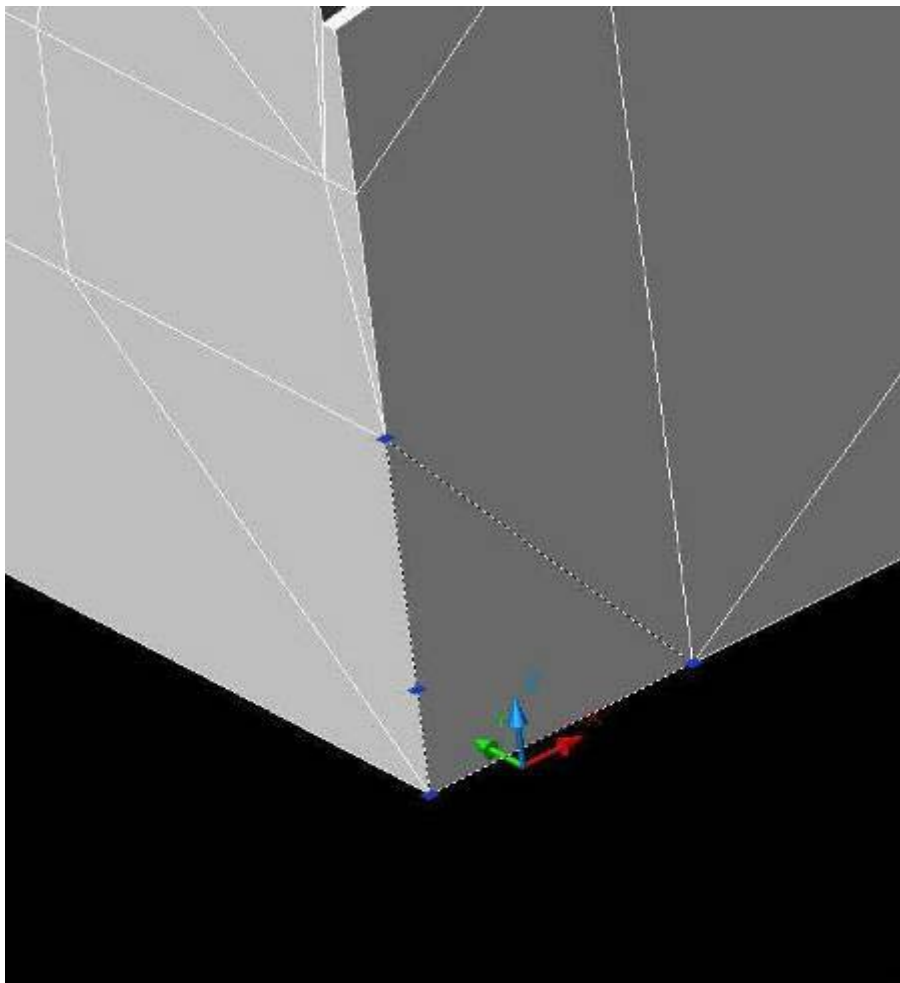
Points appartenant qu'à un plan :

Ces points sont les moins faciles à définir spatialement. On les positionne par rapport à trois points fixes du même plan.

Dimensionnement :

Le dimensionnement est la détermination des coordonnées des points en fonction de leurs caractéristiques, d'abord les points fixes qui servent de références au deux autres types de points définis dans une seconde phase.

Le dimensionnement révèle des problèmes d'importation du modèle : certaines faces censées être triangulaires ne sont pas exportées correctement par Sketchup. Un quatrième point peut apparaître sur une arête du triangle et nuire au dimensionnement.



IDFace	IDAutoCAD	Semantique	IDsegment	Niveau	IDParent	Entree	Transformation	IDPoint1	IDPoint2	IDPoint3	IDPoint4
0F0	Face_Sans_No	11	1	0	0	0.0		0	3	2	3
1F1	Face_Sans_No	38	1	0	0	0.0		1	4	5	2
2F2	Face_Sans_No	14	1	0	0	0.0		6	7	8	9
3F3	Face_Sans_No	7	1	0	0	0.0		10	11	12	13
4F4	Face_Sans_No	25	1	0	0	0.0		13	14	15	16
5F5	Face_Sans_No	32	1	0	0	0.0		16	17	18	19
6F6	Face_Sans_No	31	1	0	0	0.0		19	20	21	22
7F7	Face_Sans_No	33	1	0	0	0.0		22	23	24	25
8F8	Face_Sans_No	33	1	0	0	0.0		25	26	22	23
9F9	Face_Sans_No	8	1	0	0	0.0		27	28	29	30
10FA	Face_Sans_No	22	1	0	0	0.0		31	13	5	4

IDPoint	X	Y	Z	Precision
0	999531.97748	112547.61742	140.01867207	0
1	999532.0115	112547.6112	144.73747294	0
2	999535.28056	112550.38218	144.81234877	0
3	999535.28927	112550.40823	140.01867300	0
4	999531.79090	112547.89210	144.73682657	0
5	999535.07187	112550.68994	147.3492779	0
6	999538.54834	112553.90350	150.37303421	0
7	999536.05904	112553.87015	148.36340631	0
8	999536.14848	112552.80091	148.90653787	0
9	999536.15033	112552.89453	150.98965834	0
10	999534.09308	112547.99452	151.06370907	0

IDPMR	X	Y	Z
1	999533.8813	112549.0002	148.694795
4	999558.8187	112558.2623	149.640123
5	999553.0692	112549.6698	153.527906
8	999550.9078	112547.8288	142.117505
7	999556.7094	112552.7569	147.937917
6	999554.8078	112580.8928	148.109728
9	999558.5538	112558.8031	142.694584
10	999559.6674	112555.3507	140.37285
11	999558.2298	112552.3727	143.861751
14	999553.3082	112548.7173	144.495794
15	999552.984	112549.5724	155.567694
16	999552.0584	112548.7308	153.290001
17	88954.7456	112591.0617	151.000304
18	999551.9804	112558.5843	158.472818
19	999553.9467	112550.4278	142.971331
22	999551.569	112547.2528	144.46031
23	999551.1974	112546.3523	148.939407
25	999548.7098	112545.9327	143.074144
26	999547.1402	112544.5378	147.720891

IDPlanGeom	Norm	CoefA	CoefB	CoefC	CoefD
0 PlanSol	0	0	0	-1000000	140018675
1 Cnt_Bas_D	-16.99622516	-15.99820710	1.1681131900	20337926.483	
2 Cnt_Bas_G	-1.794081059	-1.370851891	0.01111474	1948498.3749	
3 Cnt_Bas_M	-2.795790380	-3.48352334	-0.02622128	3140566.1987	
4 Cnt_Croupe	-4.611354125	-4.043142398	3.8382694000	5083635.8834	
5 Cnt_H	10.448170465	7.8794546883	0.1012451401	-11328123.19	
6 Cnt_H_Rel_D	1.8384184468	-2.227118832	-0.02148503	-1587819.996	
7 Cnt_H_Rel_G	-0.881882493	1.1189311452	0.02581818	859513.3313	
8 Cnt_sous_Toit	0.2378222070	0.215827335	2.9032633697	-262532.6508	
9 Cnt_Toit_G	15.170819814	12.774159869	-18.38825358	-18589878.68	
10 Cnt_Toit_H	-32.46682246	-29.04971139	20.971812660	35716637.785	

IDPoint	IDPlan
28	1
56	30
71	30
72	30
55	30
50	33
73	33
74	33
33	33
75	33
76	33
39	6
70	6
77	6
40	6
30	6
27	6
78	6
79	6
80	6
20	30
19	30
81	30
77	5
11	5
38	5
40	5
4	5
1	5
31	5
51	5
12	5
82	5
83	5
10	26
84	26
85	26
14	26
88	26
13	26
31	26

IDPoint	IDPlan
0	0
0	11
0	2
1	5
1	11
1	38
1	2
2	24
2	11
2	38
3	24
3	0
3	11
4	5
4	38
4	22
5	24
5	38
5	22
5	23
6	17
6	18
6	13
6	14
9	18
9	16
9	12
9	14
10	26
10	9
10	27
10	7
11	5
11	9
11	7
12	5
12	27
12	7
13	26
13	25
13	22
13	23

IDPoint	IDPlan1	IDPlan2	IDPoint2	IDPoint3	Rapport123
13	14	6	113	0.8059147834	
12	14	9	107	0.8048746911	
33	30	23	50	0.9509328819	
10	30	16	29	0.5749234873	
28	23	15	44	0.1485103972	
12	23	44	69	0.7419437017	
12	23	44	69	0.8047438262	
29	30	23	72	0.7840412844	
10	30	16	29	0.2089527852	
5	2	1	38	0.6389035555	
0	2	0	53	0.6389035555	
30	1	28	55	0.5939029972	
15	21	61	62	0.5448800448	
15	21	61	62	0.7828100968	
29	21	59	64	0.5448800448	
15	21	61	62	0.4180313835	
12	23	44	69	0.6106599894	
12	23	44	69	0.4574989889	
12	23	44	69	0.3352353427	

IDPol	IDPlan	IDPoint2	IDPoint3	IDPoint4	Rapport12	Rapport13	Rapport14
34	30	20	55	18	0.8708344118	0.3330155087	0.5161896883
35	30	20	55	18	0.5784219036	0.4381543084	0.5385351400
36	30	20	55	16	0.4110345884	0.5901971770	0.3486300598
37	30	20	55	16	0.5324103959	0.5168526837	0.3167749654
45	30	20	55	16	0.3234530904	0.8155273814	0.5669789017
47	30	20	55	16	0.6428713876	0.4920058375	0.3503800368
49	30	20	55	16	0.582740439	0.5011580594	0.3263040954
81	30	20	55	16	0.1492854894	0.9218829533	0.4788857034
96	37	79	89	83	0.3927398948	0.7012485597	0.1632044631
97	37	79	89	83	0.4848871200	0.5443077580	0.3278548559
86	37	79	89	83	0.7543834103	0.2556781714	0.6644456284
89	37	79	89	83	0.8042354872	0.3982761756	0.4873331459
103	10	29	102	30	0.1942882184	0.8165784276	0.2796733318

Les tables de la base de données

Annexe D :

Liste des publications

ALBY, E., GRUSSENMEYER, P., PERRIN, J.-P. (2003). Integration of close range photogrammetric surveys in the design process of architectural projects. In XIXth CIPA International Symposium, Antalya, Turkey. Sept. 30th. Oct 4th, 2003. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXIV-5/C15 ISSN 1682-1750, pp. 46-51.

BELBLIDIA, S., ALBY, E. (2003) Implicit Handling of Geometric Relations in an Existing Modeler, CAADRIA 2003. Proceedings of the 8th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia / ISBN 974-9584-13-9. Bangkok Thailand 18-20 October 2003, pp. 613-622

ALBY, E., GRUSSENMEYER, P., PERRIN, J.-P. Apports du relevé photogrammétrique au processus du projet architectural. Colloque "PIXELS ET CITÉS" "Télédétection et photogrammétrie pour le développement en milieu urbain" Marne-la-Vallée (France) 26 - 28 novembre 2003.

FUCHS, A., ALBY, E., BEGRICHE, R., GRUSSENMEYER, P., PERRIN, J.-P. (2004). Confrontation du relevé laser 3D aux techniques de relevé conventionnelles et développement d'outils numériques pour la restitution architecturale. Revue de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection n°173/174 (2004-1/2), pp. 36-47.

ALBY E, Combinaison des connaissances architecturales et de l'acquisition photogrammétrique dans la représentation d'ouvrages existants. 72e colloque de l'ACFAS (Association francophone pour le savoir), 10-12 mai 2004. Montréal, Canada.

ALBY, E., GRUSSENMEYER, P., PERRIN, J.-P. (2004). Visualization of architectural works by photogrammetry: a compromise between measurement and representation. International CIPA Workshop on Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres. 25-27. Octobre 2004, Lisbonne, Portugal.

ALBY, E., GRUSSENMEYER, P., PERRIN, J.-P. (2005). Analogy between the architectural design process and the documentation of architectural works. In XXth CIPA International Symposium, Torino, Italy. Sept. 26th. Oct 1st, 2005. ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXVI-5/C34 ISSN 1682-1750 & CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XX-2005 ISSN 0256-1840, pp. 631-636.

GRUSSENMEYER, P., ALBY, E., MEYER, R., RAMPAZZO, M., (2006). 3D building model as an interface for a Web Information System. Case study of the Pontonniers high school in Strasbourg. ISPRS Comm. V Symposium, Dresden, Sept. 25-27, Germany. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5, ISSN 1682-1750.

PATIAS, P., SYLAIIOU, S., SECHIDIS, L., SPARTALIS, I., GRUSSENMEYER, P., MEYER, E., LANDES, T., ALBY, E. (2006). A Proposed Low-cost System for 3D Archaeological Documentation. Project paper from the joint event CIPA/VAST/EG/EuroMed 2006, The e-volution of Information Communication Technology in Cultural Heritage, EPOCH Publication, ISBN-10: 963 8046 75 9, pp.145-149.