

PAROS

Photogrammétrie et modèles objet appliqués à l'étude de l'architecture construite

Michel FLORENZANO, Jean-Yves BLAISE et Pierre DRAP

Abstract. In the field of the architectural patrimony, the building up of surveying and knowledge representation tools gives new analysis opportunities, and favour the drawing up of reconstructional hypothesis. Addressing this question, the PAROS (Photogrammetry of Architecture, Rendering and Outputs of Synthesis images) research implements architectural models used as a pre-requisite for the survey process. Individual objects are identified and organised following the object-oriented approach in computer science. These elementary entities gather in their definition both morphological data and patrimonial informations. They are grouped into consistent sets of objects through relations stemming from the architectural vocabulary and implemented in a language developed for this purpose. Measurements are carried out on predefined morphological specificities of these entities. Experiments presented here focus successively on the survey process (Portico of the Roman forum in Arles), on the representation of reconstructional hypothesis (the Bigot model of ancient Rome) and on structural analysis (study of a brick wall).

PAROS and its continuation MOMA (Models and Optical Measurements in Architecture) describe architecture in order to favour a measurement phase that will inform the architectural model (survey takes into account predefined models of objects) and to gather heterogeneous data in an information tool dedicated to the architectural patrimony.

Résumé. Le projet PAROS (Photogrammétrie Architecturale et Restitution par Outils de Synthèse) et son prolongement MOMA (Mesures optiques et Modèles Architecturaux) proposent un outil de formalisation des connaissances architecturales et d'exploitation de la

✉ Michel FLORENZANO, Architecte dplg, Chargé de recherche au CNRS, Directeur du GAMSAU [= Groupe d'études pour l'Application des Méthodes Scientifiques à l'Architecture et à l'Urbanisme]; Jean-Yves BLAISE, Architecte ENSAIS, Enseignant-chercheur; Pierre DRAP, Docteur en Informatique, Chargé de recherche au CNRS; GAMSAU; URA CNRS n° 1247 École d'Architecture de Marseille-Luminy; 184, avenue de Luminy; F-13288 Marseille Cedex 09 (France).

Fax : +33 4 91 82 71 71

E-mail : Michel.florenzano@gamsau.archi.fr

Jean-Yves.Blaise@gamsau.archi.fr

Pierre.Drap@gamsau.archi.fr

<http://www.gamsau.archi.fr>

mesure photogrammétrique. Il se situe à l'articulation des domaines de la modélisation de la connaissance et de la photogrammétrie architecturale. Cette démarche s'appuie sur trois axes de recherche :

- Formalisation centrée objet des modèles théoriques : classer par spécialisation et agrégation les objets étudiés (architecturaux et géométriques).
- Confrontation Modèle/Mesure : une étude par lecture comparative où l'aide au diagnostic architectural est basée sur l'évaluation des écarts entre le modèle théorique et le résultat du traitement des données photogrammétriques.
- Mécanismes de simulations/reconstitution d'édifices : utiliser les définitions typomorphologiques répertoriées pour assembler, « au mieux », les éléments d'architecture.

Ce travail est particulièrement axé sur le lien entre la mesure photogrammétrique et les modèles architecturaux mis en œuvre. Pour illustrer cette nouvelle approche du relevé d'architecture, trois expérimentations sont proposées :

- une aide au diagnostic ainsi qu'une reconstitution par déduction sont réalisées sur les vestiges en élévation du portique du forum antique d'Arles ;
- une mise en scène d'hypothèses archéologiques, sur le premier temple du Capitole de la Rome antique, est proposée à partir du Plan Bigot (maquette de la Rome antique du IV^e siècle, Maison de la Recherche en Sciences Humaines de l'université de Caen) ;
- enfin le lien avec des logiciels de mécanique, qui permettra des calculs de structure sur des édifices en appareillage de bloc, est esquissé lors de la troisième expérimentation où, sur une maquette d'un mur de brique, l'on étudie le lien entre un modèle numérique et la mesure photogrammétrique.

Keywords: Architecture, cultural heritage, modeling, imagery, knowledge base, close range, object oriented programming.

Mots-clés : Architecture, représentation de la connaissance, programmation orientée objet, patrimoine architectural.

1. Hypothèses

1.1. Patrimoine architectural

Le projet PAROS¹ (Photogrammétrie Architecturale et Restitution par Outils de Synthèse) propose un outil de production de relevés architecturaux s'appuyant sur une formalisation de données patrimoniales. On s'attache à rechercher une méthode dans laquelle la problématique du relevé (traitement d'informations géométriques) intègre celle du patrimoine architectural (gestion de connaissances). La méthode proposée rend compte de deux contraintes liées aux spécificités du domaine d'application :

- domaine de production normatif dans ces principes, mais localement irrégulier (par suite de destructions partielles, de réemplois, etc.) ;

¹ PAROS est un programme de recherche soutenu par la MRT (Mission de la Recherche et de la Technologie) du ministère de la culture français.

— relevés dont les cahiers des charges privilégient ici, l'économie de mesurage, là, la précision ou l'exhaustivité.

Nous nous appuyons sur des modèles canoniques d'architecture, objets élémentaires prédéfinis, sur lesquels portera le relevé. Jusqu'à présent le corpus traité correspond aux productions architecturales de l'Antiquité grecque et romaine.

Le domaine de l'Architecture est ici considéré comme une combinatoire d'entités dont les propriétés décrivent morphologie, position et fonctions dans l'édifice ainsi que les informations non graphiques qui s'y rattachent.

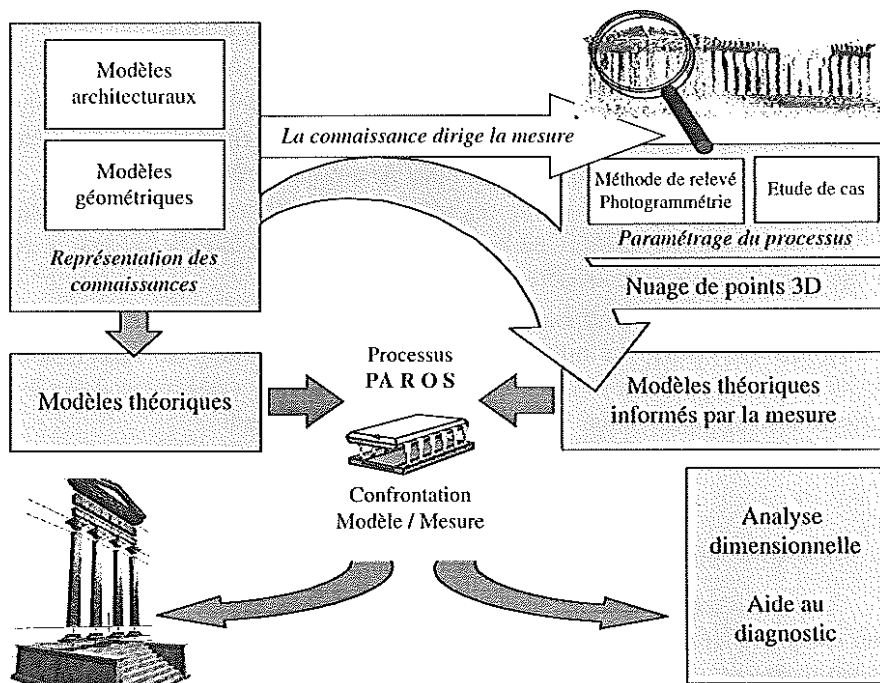


Fig. 1.- Schéma synoptique

L'élément d'architecture ainsi défini devient modèle. Le langage architectural s'analyse donc par une discrétisation de l'édifice en entités. L'approche objet est utilisée pour formaliser ces modèles et les organiser hiérarchiquement par l'observation de similitudes.

La diversité des objets architecturaux et l'importance de leur modénature nous ont conduits à rechercher sur ces entités des particularités

morphologiques stables sur lesquelles portera la mesure. Une hiérarchie d'objets géométriques capables de rendre compte de la morphologie des entités architecturales est destinée à faire le lien entre la mesure et la forme.

L'édifice est considéré comme un assemblage de ces entités au moyen de relations de composition prédéfinies. Nous définissons, par similitudes de comportements, une hiérarchie d'ensembles d'entités que nous appelons *réseaux*.

1.2. L'outil de mesure : la photogrammétrie

La technique photogrammétrique procède en deux phases :

- une phase d'acquisition économique (rapide et sans contact) où l'on enregistre simultanément les informations géométriques qui serviront au calcul 3 D et des informations qualitatives relatives à la surface de l'édifice (informations transmises par le médium photographique);
- une phase d'exploitation de ces informations géométriques sur l'édifice où l'on peut adapter au besoin de l'utilisateur tant la précision du relevé que son exhaustivité.

Cette souplesse d'utilisation constitue l'argument de base du choix technique de l'outil de relevé, elle impose la présence de l'opérateur humain dans les étapes du processus de mesurage, opérateur dont les actions seront guidées par un protocole expérimental.

2. Les entités architecturales

Travail d'extraction, de détermination de régularités, la description des modèles architecturaux s'appuie sur une étude du vocabulaire de l'architecture.

C'est en effet une démarche d'analyse puis d'organisation de modèles abstraits, visant à isoler des entités élémentaires sur lesquelles s'appliquent des relations pour former un ensemble bâti. Le concept d'entité architecturale réunit dans une même classe les données architecturales décrivant l'entité, les mécanismes d'interfaçage avec la mesure et les méthodes de représentation. Ceci nous a conduits vers un modèle générique d'entité, construit autour d'objets hétérogènes et de méthodes de communication vers d'autres outils. Ces objets structurant l'entité peuvent être classés en trois grandes familles :

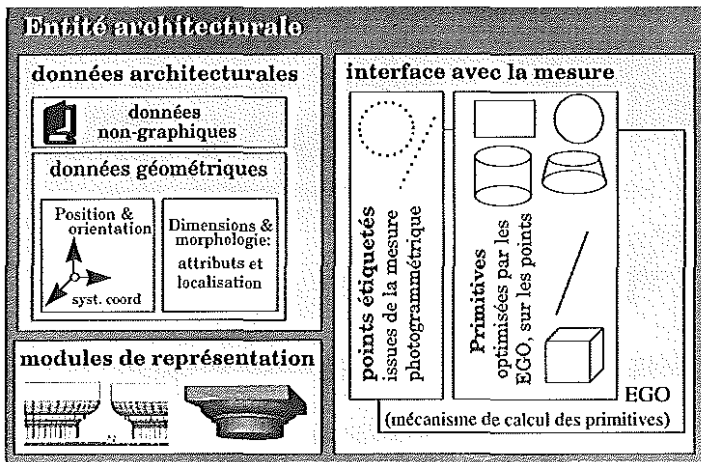


Fig. 2.- Structure interne d'une entité

- les objets décrivant les propriétés non graphiques des entités ;
- les objets appartenant à l'univers de la géométrie tels que points, vecteurs, matrices, référentiels ;
- ceux dédiés à l'interfaçage avec la mesure, ceux-ci sont appelés EGO pour Êtres Géométriques Optimaux.

Le concept d'entité, défini ainsi, est bien un élément d'architecture qui dépasse le cadre pur d'une description de l'édifice en entités élémentaires et prend en compte la problématique de la mesure. Dès lors l'objet architectural véhicule des informations sur sa nature et sa typomorphologie, sa position et son orientation dans le référentiel du bâtiment, ses dimensions, et la méthodologie du mesurage (fiabilité des grandeurs caractéristiques, incertitude de mesure).

3. Les réseaux

Décrire le patrimoine architectural, et le relever, s'inscrit dans une vision finalisée sur l'édifice, où la mesure est liée à des préoccupations souvent diverses.

Le réseau est un ensemble entités-relations, intégrant des mécanismes d'analyse et de représentation. C'est une représentation de la combinaison des entités sous la forme de systèmes entités-relations.

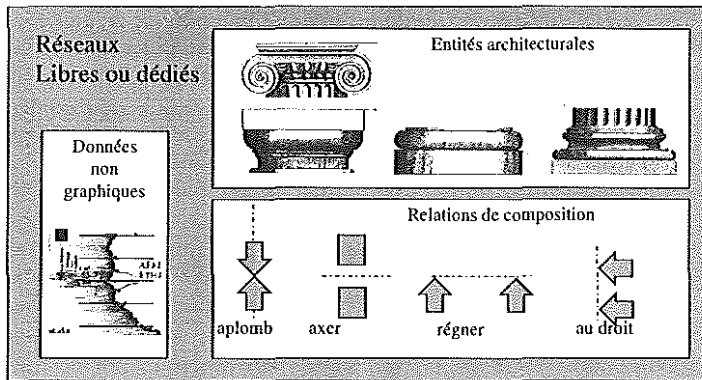


Fig. 3.- Structure interne des réseaux

Le réseau sera donc une unité d'analyse, formalisée pour rendre compte d'un point de vue sur l'édifice. Une même entité, le fût de colonne, participe autant à la définition canonique des colonnes qu'à celle des ordres architecturaux. La présence, dans la hiérarchie des réseaux, de colonnes ou d'ordres correspond à deux niveaux de lecture de l'architecture.

Chaque entité dispose d'attributs de calage, (Axes, Origine, Arase, etc.) essentiellement hérités de la classe de base *entité*, qui définissent l'interface par laquelle le réseau pourra la positionner et l'orienter dans le référentiel de l'édifice. Les relations d'adjacence (connexité des surfaces) et de composition sont utilisées pour appliquer des règles théoriques d'organisation des entités.

Les confrontations modèle/mesure sont gérées par des *réseaux*, formalisant des ensembles quelconques d'entités et de règles d'assemblage.

Une grammaire simple permet de décrire les réseaux (choix des entités, des règles à utiliser, paramètres du processus de mesurage) au travers de scripts interprétés par un analyseur syntaxique. Ce script permet d'accéder aux entités qui composent le réseau et aux grandeurs qui le caractérisent comme par exemple le module, le nombre de colonnes, l'entrecolonnement, etc.

4. Formalisation du modèle architectural

4.1. Une architecture modulaire

Le processus Paros repose sur l'hypothèse de l'existence d'un modèle théorique de l'architecture construite. Nous avons choisi l'architecture antique comme terrain d'expérimentation du procédé. Ce type d'architecture se prête bien à une modélisation : le rôle central des règles de proportions modulaires nous permet une description simple de la morphologie des entités. L'hypothèse de base du projet nous conduit à confronter le modèle théorique du bâtiment à l'observation et la mesure. L'élaboration du modèle théorique repose sur l'existence de régularités proportionnelles dans le système constructif et dans la modénature de l'architecture antique. La notion de norme, pour définir cette approche constructive, est tentante. Un édifice antique sacré était construit autour de cette notion de module, « unité de mesure propre qui, selon l'usage antique, structure sa composition » (Varène, 1994, p. 17). L'ensemble des dimensions inter- et intra-entités sont réductibles à un rapport simple au module. Cependant l'existence d'une norme architecturale dans l'Antiquité pose quelques problèmes.

Tout d'abord la stabilité de cette norme, stabilité dans le temps et dans l'espace.

La notion d'Antiquité couvre près de dix siècles comme l'illustrent les deux expérimentations que nous proposons : le temple Jupiter Capitolin à Rome au VI^e siècle av. J.-C. et le portique nord du forum de la ville d'Arles en Gaule au IV^e siècle ap. J.-C.

Puis la stabilité dans l'espace : l'architecture antique s'est développée dans tout le bassin méditerranéen, d'abord sous l'influence hellénistique puis sous celle des conquêtes romaines. L'étendue du domaine en regard des moyens de communication de l'époque rend peu probable une norme unique d'Arles à Palmyre.

Par ailleurs, outre le problème de la stabilité de la norme il reste celui de sa transmission jusqu'à nous. Elle s'est effectuée selon deux voies : les édifices eux-mêmes, qui sont souvent ruinés voire arasés, dont les vestiges sont à déchiffrer, et la connaissance livresque. Il ne nous reste qu'un seul traité d'architecture décrivant les édifices grecs et romains de la période antique ; c'est le *De architectura* de Vitruve (Fleury, 1995). Un seul livre, un seul auteur pour couvrir dix siècles d'architecture du bassin méditerranéen. Le *De architectura* est écrit à Rome, à la fin de la République. L'auteur, pour les deux raisons évoquées

plus haut, ne pouvait avoir eu connaissance de l'ensemble de la production architecturale des cinq derniers siècles dans le bassin méditerranéen, même s'il avait voyagé et possédait une connaissance livresque de l'architecture hellénistique. Par ailleurs, il ne possédait sûrement pas l'autorité pour imposer après lui une norme architecturale dans tout l'empire. Vitruve ne pouvait être que le témoin d'un état de la production architecturale dans l'Antiquité en un temps et un lieu donnés.

L'étude de l'édifice doit donc prendre en compte l'utilisation possible d'éléments de réemploi (issus d'autres constructions) et doit, par la mesure, déterminer les proportions modulaires de la modénature des entités architecturales. Il faut citer à ce propos, l'étude du temple Portunus par Jean-Pierre Adam (1994, chapitre V), où l'analyse de la campagne de mesures faite sur le temple permet de retrouver les tracés régulateurs et les proportions modulaires. L'analyse doit prendre en compte :

- les hypothèses archéologiques sur les rapports modulaires,
- l'incertitude de mesure,
- l'érosion et la dégradation de la pierre,
- les restaurations passées du bâtiment au cours desquelles des éléments ont été remplacés.

Les proportions modulaires sont alors confirmées et réévaluées à l'aide de la mesure.

4.2. Formalisme objet

L'approche informatique centrée objet nous permet de rechercher des modèles de représentation de ces entités, capables de produire par filiation des objets particuliers. Nous isolons donc des familles d'objets dont la structure ou le comportement présentent des similitudes.

Le corpus étudié est décrit sous forme de classes d'objets dont les propriétés communes sont factorisées au sein d'une classe abstraite. L'entité architecturale dispose de propriétés décrivant sa nature (dimensions, éléments de définition, etc.) et son comportement au sein du système de relations qu'est l'édifice.

Les entités étant définies, le relevé de leurs morphologies revient en fait à renseigner la valeur de leurs attributs dimensionnels. Cette étape utilise des primitives géométriques simples décrivant des parties significatives de la surface des entités. Ces primitives géométriques sont le lien entre le résultat de la mesure et les attributs morphologiques des entités.

4.3. Factoriser les informations

Nous avons défini, dans la classe entité, un ensemble d'attributs et de méthodes communs à tous les éléments du corpus concerné par le projet Paros : référentiel, nu, arase, méthodes d'écriture graphique, etc. La même approche est utilisée dans les sous-arbres de la hiérarchie où des classes abstraites représentent des concepts génériques.

Par raffinements successifs, les concepts isolés se définiront par adjonction de propriétés. Celles-ci correspondent à des types d'informations hétérogènes : attributs dimensionnels, éléments de définition architecturaux ou patrimoniaux, outils de définition liés à la mesure, modules de représentation.

Le schéma de la figure 4 montre l'organisation des informations utiles à la description d'une base toscane. Celle-ci ne se différencie d'une base « générique » que par sa forme décrite par quatre attributs spécifiques déclarés dans la classe :

- le rayon et la hauteur de la plinthe,
- les deux rayons du tore.

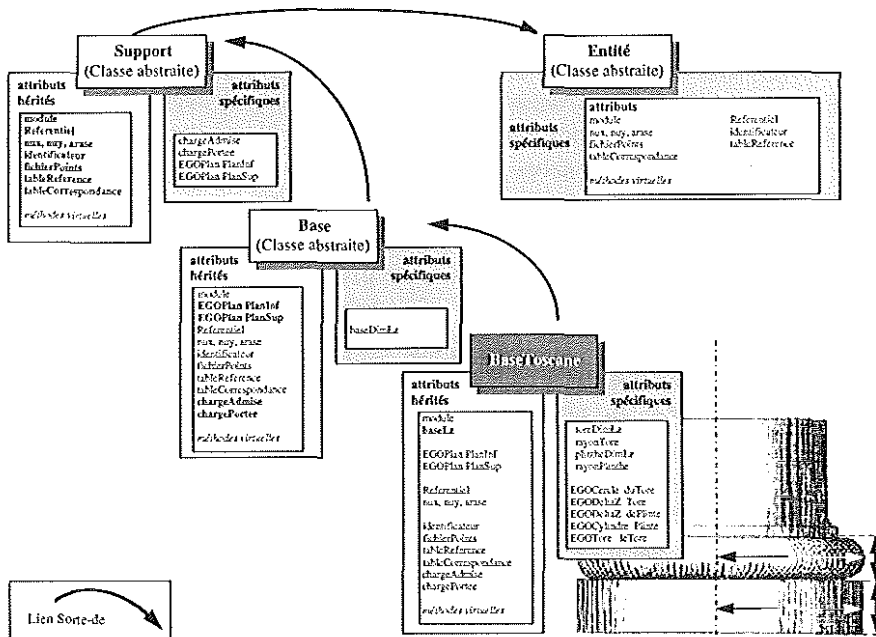


Fig. 4.- Données spécifiques et héritées de la base toscane

La base toscane possède les EGO nécessaires à une éventuelle mesure de sa morphologie et, si la mesure fait défaut, peut accéder à une table de correspondance permettant de mettre en œuvre les mécanismes de proportion modulaire la dimensionnant. Elle est seule, dans l'exemple ci-dessus, à posséder un constructeur et à pouvoir instancier une entité.

4.4. Les outils géométriques

La mesure de la forme des entités est gérée par des objets capables de recalculer une géométrie parfaite en s'appuyant sur une série d'observations. La photogrammétrie ne fournit qu'un nuage de points mesurés sur la surface de l'objet observé et chaque point est entaché d'une erreur aléatoire centrée (car supposée exempte de systématisme). La forme des entités sera évaluée au travers de primitives géométriques simples. Elles seront calculées par les objets des classes EGO (Être Géométrique Optimal) à partir des nuages de points mesurés. Les EGO sont en fait des modèles fonctionnels décrivant les relations liant le modèle théorique visé (la primitive géométrique) et les quantités observées (les points mesurés en photogrammétrie).

Ainsi, pour chaque primitive géométrique supportée, il existe, dans la classification décrivant les primitives, une classe apte à effectuer toutes les opérations qui s'y rattachent (affichage, calcul dans l'espace...). Par ailleurs, une classe homologue dans l'arbre des EGO décrit son modèle fonctionnel et assure le lien entre la mesure et la primitive géométrique.

Chaque classe de l'arbre des EGO a pour membre une primitive homologue de l'arbre des primitives géométriques.

Les EGO se chargent donc de l'interface entre la mesure et la géométrie. La méthode consiste à minimiser la somme des carrés des distances dans l'espace entre les observés (les points) et le modèle théorique (la primitive géométrique). En d'autres termes la primitive géométrique calculée par l'EGO passe au mieux (au sens des moindres carrés) par le nuage de points observé.

On le voit encore une fois le calcul s'appuie sur la connaissance qu'a l'opérateur du domaine lors de la phase de mesurage. En effet les points ont été non seulement affectés à des entités architecturales mais aussi à des primitives géométriques. Il appartient à l'opérateur de vérifier *a posteriori* la pertinence du modèle géométrique proposé lors de la phase de mesurage. Une étude attentive des résidus (écart entre les points mesurés et la primitive calculée) et de la répartition des points sur la primitive doit valider ce modèle.

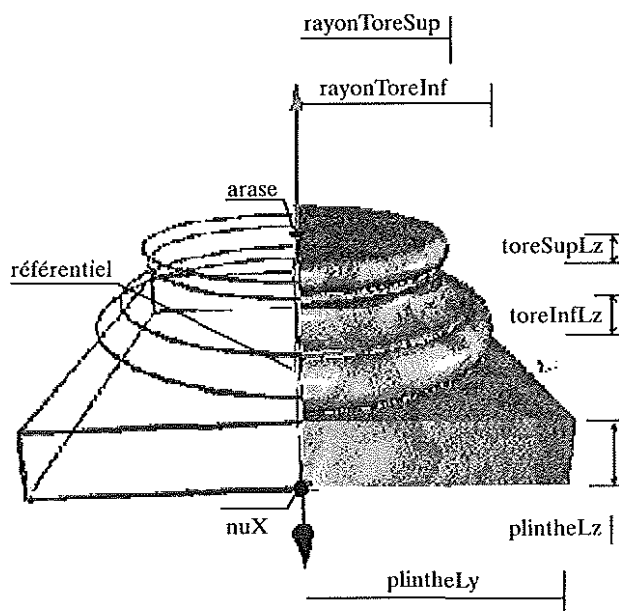


Fig. 5.- Correspondance entre les attributs morphologiques d'une entité et les primitives géométriques mesurées.

4.5. Confrontation avec la mesure

La méthode d'analyse de la pertinence du modèle théorique, et de son adéquation avec la mesure, tente de mettre en coïncidence le canevas de points représentant les entités mesurées et le canevas de points issus du modèle théorique (décrit par le *réseau*). Ceci est réalisé en recherchant les paramètres de la transformation (Translation + Rotation) qui permet de superposer les deux canevas de points en minimisant la somme des carrés des résidus (distance, dans l'espace, entre les points homologues des deux canevas).

Cette confrontation du modèle mesuré et du modèle théorique constitue le point de départ d'une aide au diagnostic architectural et à la détection de pathologie.

5. Une expérimentation sur le portique nord du forum de la ville d'Arles

Les vestiges du portique du forum antique de la ville d'Arles s'inscrivent dans un ensemble architectural bien plus important. L'élaboration des modèles architecturaux a été menée en collaboration avec l'Institut de Recherche sur la Provence Antique (IRPA) en Arles. Les vestiges du portique mesuré étant en très mauvais état, la finalité de la campagne de mesure a clairement été posée en terme de simulation d'un état antérieur possible et non dans une optique de diagnostic du bâtiment.

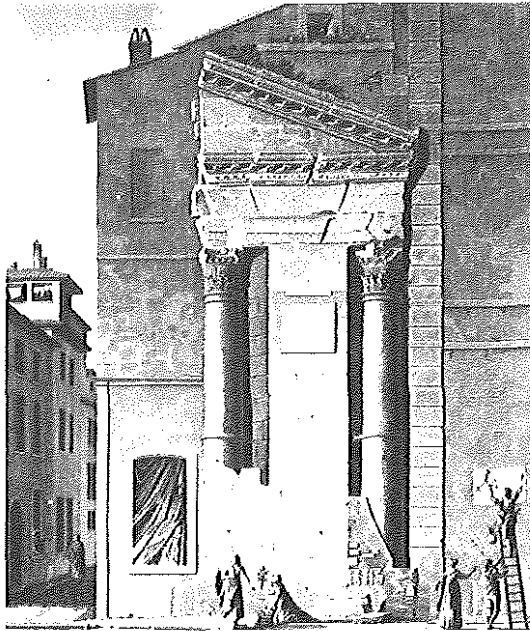


Fig. 6.– Le forum d'Arles, gravure du XIX^e siècle

Comme on peut le voir sur la gravure ci-dessus, il ne reste plus de cet édifice que deux colonnes incomplètes et la moitié de l'ensemble entablement-fronton, le tout étant enchâssé dans les murs d'un bâtiment récent. Depuis l'époque de la construction le niveau du terrain a changé et l'emmarchement du podium est recouvert par la place du forum.

Les caractéristiques de ces vestiges nous permettent de mettre en œuvre le processus Paros dans sa dimension de reconstitution d'édifices s'appuyant sur des hypothèses archéologiques ; par contre, le mauvais état

des vestiges n'autorisera pas une étude significative de la structure du bâtiment. Les vestiges, enchâssés dans un mur, ne sont plus autonomes en terme de statique.

5.1. Conditions de prise de vues

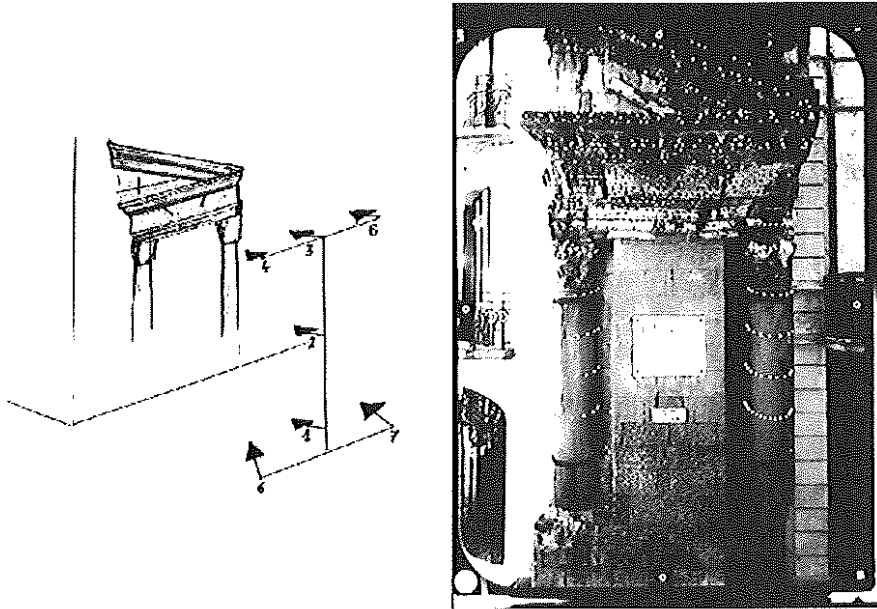


Fig. 7.- Schéma de prise de vue et prise de vue photogrammétrique : les points mesurés sont en réserve sur l'image de droite.

Nous avons isolé sur l'édifice 13 entités architecturales, sur lesquelles les services de l'Atelier du Patrimoine, ont saisi 654 points. Chaque entité architecturale, comme élément du corpus préétabli, a fait l'objet d'une description par le biais de primitives géométriques correspondant à des spécificités mesurables de sa morphologie. Les entités architecturales assemblées autour du *réseau* décrivant le portique forment un canevas tridimensionnel sur lequel s'appuiera la validation des hypothèses de composition choisies.

Ci-après figurent les résultats de l'adaptation de ce canevas tridimensionnel sur les entités mesurées. Nous obtenons, pour chacune des

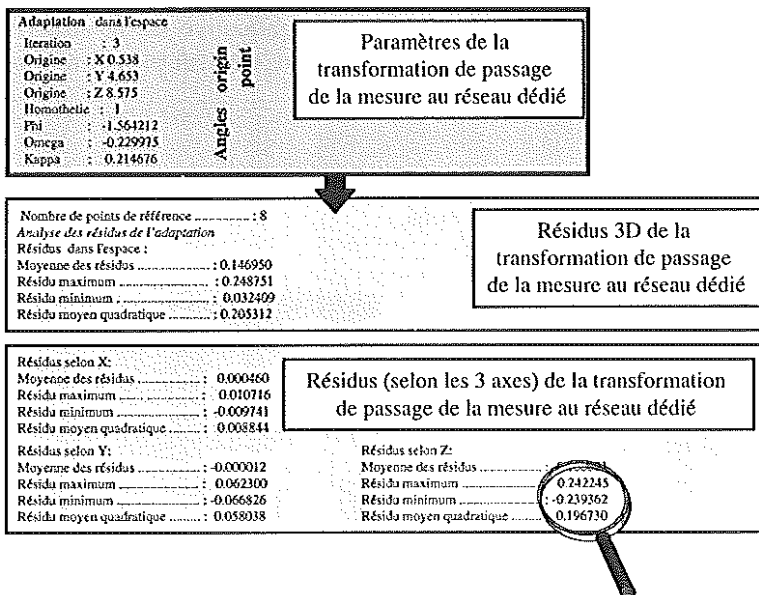


Fig. 8.- Lecture de l'influence de la mise en cohérence (application des règles théoriques de composition) sur les entités architecturales.

entités, le déplacement minimum à apporter pour satisfaire les règles de composition relatives au corpus étudié.

Dans le cas du portique présenté ici, l'incohérence constatée entre le modèle de proportions des colonnes et l'observation va bien dans le sens des conclusions archéologiques; il s'agit de fûts de réemploi (l'écart en Z est nettement supérieur à la précision de la mesure, il est donc significatif d'un problème). En effet, le diamètre des fûts observés est nettement plus important que ne le laissent penser les modèles théoriques.

5.2. Le complètement

Lors de la phase de complètement, des mécanismes de déductions nous permettent d'instancier les entités non mesurées, pour satisfaire le modèle théorique sous-jacent. Les caractéristiques de ces nouvelles entités s'appuient sur les données rassemblées à chaque étape du processus, et renseignant à la fois leurs dimensions et leurs positions dans l'ensemble de la composition.

Cette phase, ici aboutissement de l'étude, a pour objectif la reconstitution d'un modèle probable de l'ensemble *Portique* du forum. À partir des

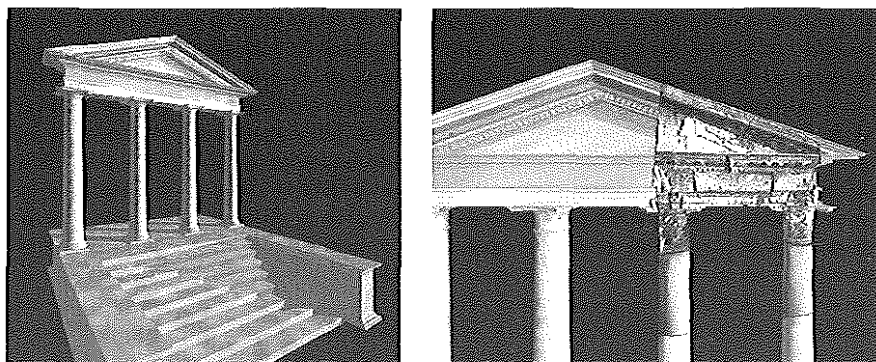


Fig. 9.- L'image du modèle reconstitué, avec, à droite, incrustation d'une photographie de l'édifice existant.

données issues du processus PAROS, nous proposons une série d'images sur lesquelles figurent à la fois les entités mesurées et les entités déduites (podium, bases, deux fûts et deux chapiteaux).

6. L'expérience de la maquette Bigot

Le Plan de Rome est une maquette en plâtre d'environ 70 m², réalisée à l'échelle 1/400, qui représente la ville de Rome, au début du IV^e siècle ap. J.-C. Elle a été réalisée au début de ce siècle par l'architecte Paul Bigot. Aujourd'hui la maquette est classée monument historique. Elle est exposée à la Maison de la Recherche en Sciences Humaines de l'Université de Caen.

La mesure, dans cette expérimentation du projet Paros, n'intervient que pour fournir au modèle théorique une position et une orientation approchée au sein d'un référentiel général. Ici nous nous intéressons à la mise en scène d'hypothèses archéologiques qui s'organise en deux phases :

- élaboration du modèle théorique,
- mise en situation de ce modèle dans un environnement qui n'est plus à l'échelle du bâtiment mais à celle de la cité.

L'expérience s'est déroulée en collaboration avec Monsieur Philippe Fleury², directeur adjoint de la MRSH ; les mesures ont été réalisées sur

² Voir l'article de Philippe FLEURY, *La Rome antique sur Internet* dans ce même volume (N.D.É.).

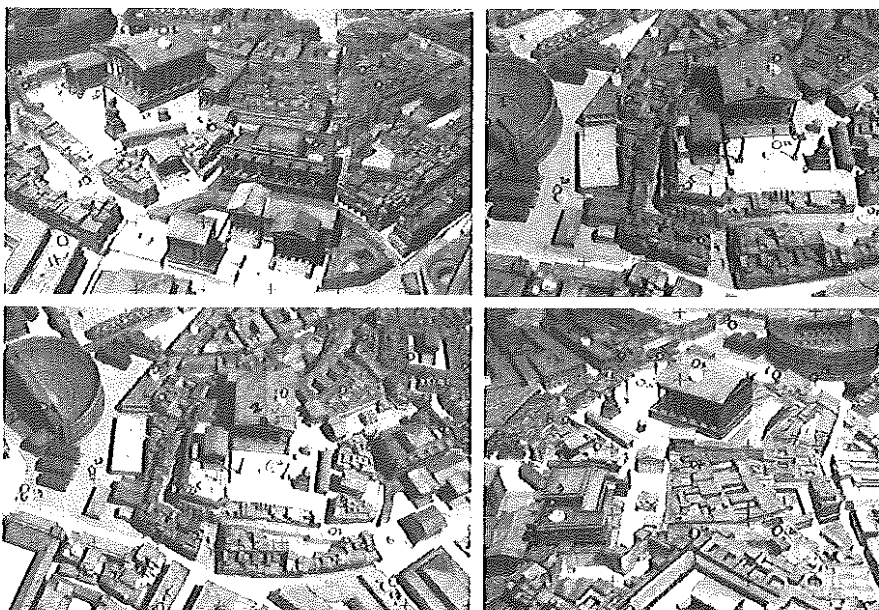


Fig. 10.- Prises de vues photogrammétriques de la maquette Bigot

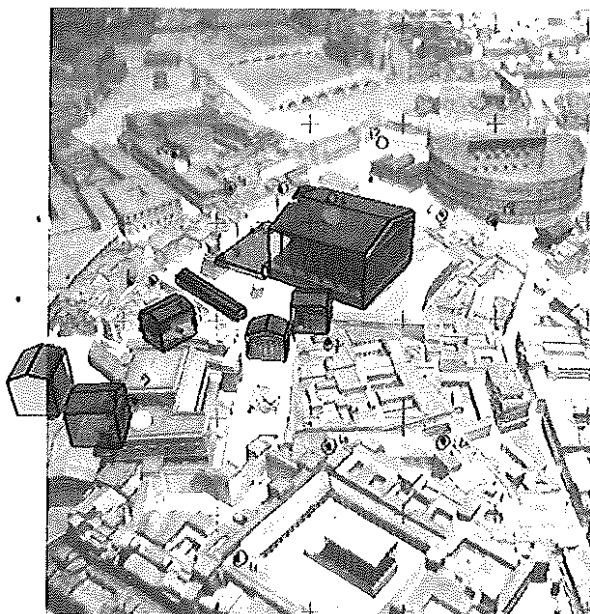


Fig. 11.- Cliché photographique avec incrustation des volumes englobants

la maquette Bigot, dans les locaux de la MRSH à Caen. Les prises de vues furent effectuées le 20 juin 1996.

6.1. Le temple du Capitole

Le premier temple du mont Capitole était un temple d'ordre toscan achevé vers 509 av. J.-C., au début de la République. Il brûla entièrement quelque quatre siècles plus tard en 83 av. J.-C. Ce temple était dédié à trois divinités différentes : Jupiter, Junon et Minerve.

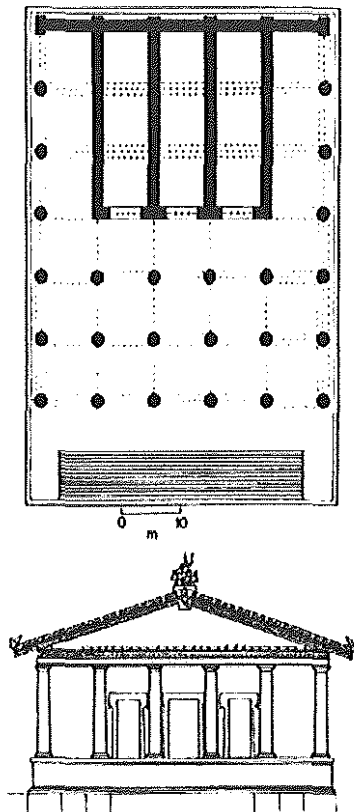


Fig. 12.- Le temple Jupiter Capitolin, hypothèse archéologique de Filippo Coarelli. (Coarelli : 1994, p. 30).

L'élaboration du modèle théorique s'appuie sur les travaux archéologiques et sera décrit par un script de définition. Le modèle théorique sera dimensionné et orienté par la mesure.

6.1.1. Mise en œuvre du processus photogrammétrique

Ici il s'agit de photogrammétrie non stéréoscopique dont les orientations des caméras sont calculées par ajustement de faisceaux. Une telle approche est plus légère que la stéréoscopie et dans le cas qui nous occupe, moins précise.

6.1.2. Mesure des clichés

La mesure des clichés photographiques ne reposant pas sur la stéréoscopie, il faut avoir recours à une autre méthode pour identifier les points homologues sur les différents clichés. Par contre il sera possible de déterminer un point dans l'espace de la maquette à l'aide de plus de deux visées. Les points mesurés doivent être aisément identifiables sur la maquette; il s'agit par exemple, de bord de toit ou de cibles mises en place pour la mesure. Cette approche est compatible avec le cahier des charges de l'expérience, le détail de la modénature des entités n'est pas à relever. Le positionnement et l'orientation de l'édifice peuvent être appréhendé par quelques points caractéristiques du bâtiment.

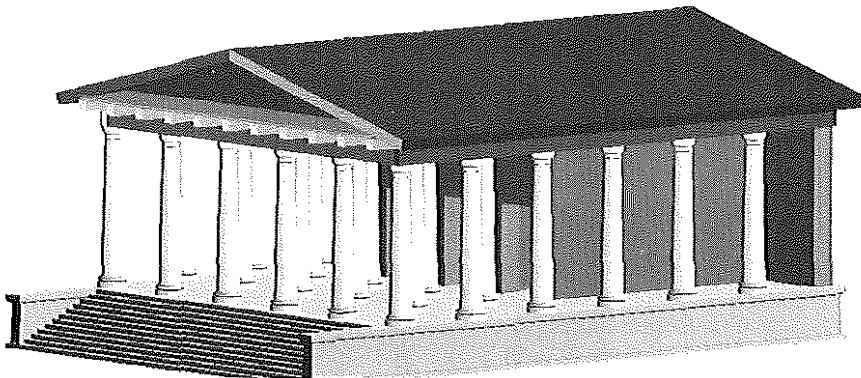


Fig. 13.- Mise en scène de l'hypothèse de Filippo Coarelli sur le temple Jupiter Capitolin, traitement de l'éclairage par le modèleur *Autocal*.

6.2. La mesure dimensionne le modèle

La finalité de la mesure photogrammétrique se limite aux volumes englobants des bâtiments pour pouvoir positionner les modèles théoriques élaborés précédemment, au travers de leurs descriptions textuelles. On peut voir, à la figure 11, les volumes englobants des édifices mesurés,

représentés par le logiciel de CAO *MicroStation*TM. Les représentations en perspective sont faites depuis les points de vue des caméras calculés par l'ajustement de faisceaux.

À ce stade, il suffit de déterminer l'origine du podium et la matrice d'orientation du bâtiment pour positionner et orienter le réseau libre décrivant le temple toscan.

6.3. Bilan de l'expérience

Cette expérimentation nous a permis de valider le processus d'élaboration d'un modèle théorique, depuis le détail de sa modénature jusqu'à l'ordonnement des entités architecturales.

Nous avons montré que ce modèle peut être positionné au sein d'un ensemble urbain par un procédé de mesure photogrammétrique.

Dans le cadre de cette expérimentation sur la maquette Bigot, le souci de précision du mesurage photogrammétrique s'efface derrière les recherches bibliographiques nécessaires à la formalisation du modèle théorique. Nous avons employé un procédé photogrammétrique relativement léger destiné à positionner l'édifice dans la maquette. L'intérêt évident d'une maquette numérique est sa composante dynamique qui permet de mettre en scène des hypothèses archéologiques diverses ou de représenter l'accroissement d'un tissu urbain dans le temps.

7. La simulation du comportement des édifices en appareillage de blocs

7.1. Une nouvelle direction de recherche

Nous nous proposons de simuler le comportement mécanique des grands édifices patrimoniaux en appareillage de blocs en utilisant les méthodes développées par les mécaniciens pour la simulation du comportement de structures homogènes (modèles des éléments finis ou discrets). En s'appuyant d'une part sur les modèles architecturaux mis en place au GAMSAU, d'autre part sur le lien développé entre ces modèles et une technique de mesure (la photogrammétrie), les modèles traités par la méthode des éléments finis gagneront en pertinence.

La simulation du comportement des édifices en appareillage de blocs rendra compte tout à la fois :

- d'une connaissance structurelle de l'édifice (véhiculée par le modèle architectural),
- d'une finesse dimensionnelle (la photogrammétrie est un moyen de mesure très précis — précision relative de l'ordre de 10^{-4} ,
- bien sûr d'un ensemble de connaissances mécaniques issu de l'expérience et de mesures directes.

Une expérimentation de cette approche se fera à l'occasion d'un travail plus général sur le Palais de Papes en Avignon. Les modèles architecturaux seront élaborés en collaboration avec une équipe d'archéologues médiévistes (LAMM CNRS, Aix-en-Provence).

Le modèle architectural est complexifié pour répondre à cette nouvelle demande. Jusqu'alors l'édifice était représenté par un ensemble d'entités architecturales en interdépendance. Si le modèle architectural rendait compte d'un ensemble de connaissances structurelles sur l'édifice, il restait trop grossier pour permettre une étude fine de son comportement mécanique. La modification de la structure interne des entités architecturales permet de représenter leurs composants (dans un premier temps nous envisageons de ne traiter que le cas de structure en appareillage de blocs simples de type hexaèdre).

La représentation géométrique simple de ces blocs permettra rapidement de mettre en œuvre une expression de la morphologie du modèle architectural qui soit compatible avec les outils de simulation par les éléments finis. La modélisation par les éléments finis rendra ainsi compte d'un modèle architectural mesuré, de son comportement et de ses composants.

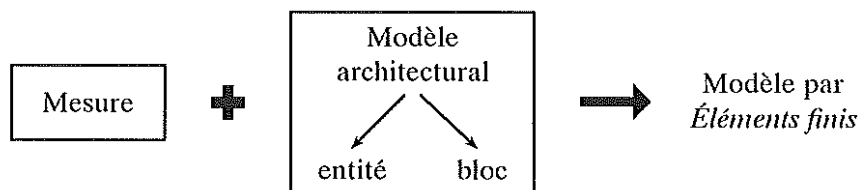


Fig. 14.- Schéma synoptique, pertinence de la modélisation par les éléments finis

7.2. État d'avancement

7.2.1. Confrontation d'un modèle numérique et d'une maquette mesurée

L'expérience présentée ci-après n'est qu'une première approche du lien entre le modèle architectural proposé par le GAMSAU et le modèle numérique servant de bases aux calculs de mécanique développés au LMA-CNRS. (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille). Nous nous sommes attachés à montrer la possibilité de confronter un

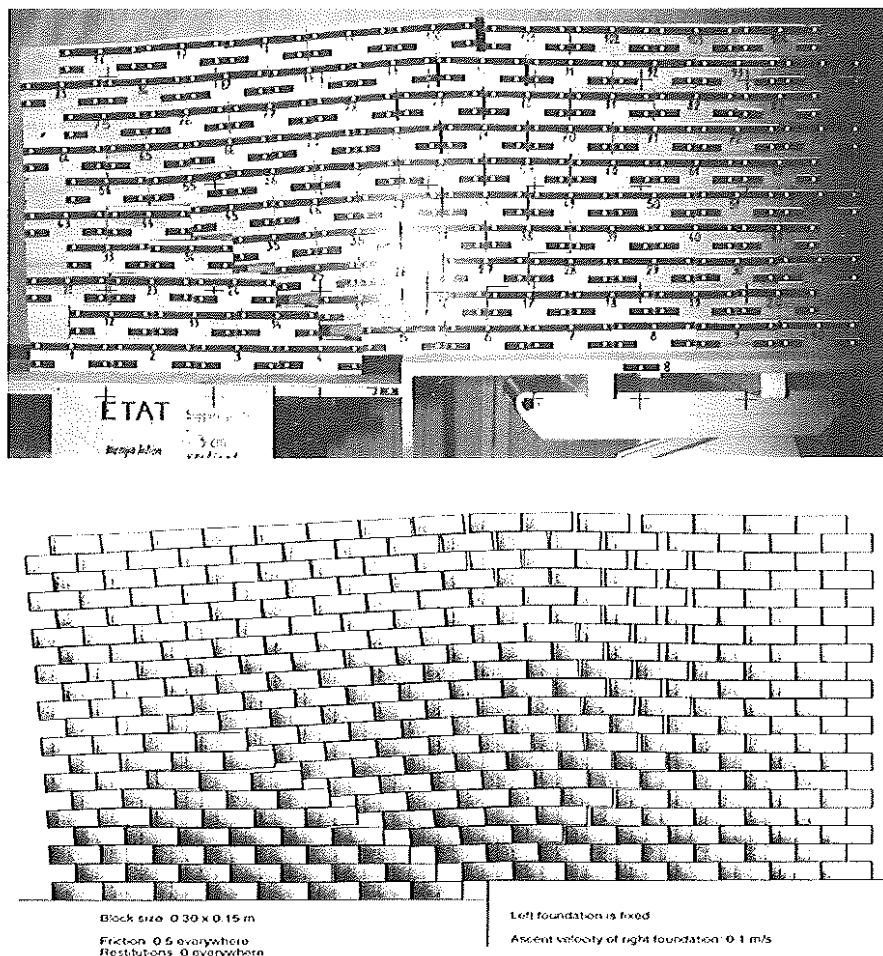


Fig. 15.- Maquette en bois (en haut) et modèle numérique (en bas)

modèle numérique d'empilements de blocs, calculé avec le logiciel LMGCC (Logiciel de Mécanique Gérant le Contact) développé au LMA et l'auscultation photogrammétrique d'une maquette d'un mur composé de blocs.

L'expérience s'est déroulée sur le cas d'un mur de briques de bois dont on a simulé l'affaissement partiel du support. Le modèle géométrique était simple à mesurer. Le modèle mathématique des propriétés mécaniques des briques de bois a été évalué par une étudiante de l'École Supérieure de Mécanique de Marseille (ESM²) au cours de son stage de troisième année. Les coefficients de frottement, module d'Young, coefficient de Poisson et les autres propriétés physico-chimiques nécessaires ont été évalués expérimentalement.

Cette première étude avait vocation à valider la démarche, il est possible à présent de travailler à l'interface de la représentation des connaissances architecturales et des logiciels de mécanique pour étudier les comportements structurels des édifices en appareillage de blocs.

7.2.2. Premiers tests de maillage

La simulation du comportement des structures architecturales passe par une phase de maillage des éléments du corpus en jeu. La finesse du maillage dépend du type de comportement observé et des connaissances structurelles rassemblées sur le modèle architectural. L'élaboration d'un maillage volumique sur un corpus à la modénature complexe n'est pas une chose triviale.

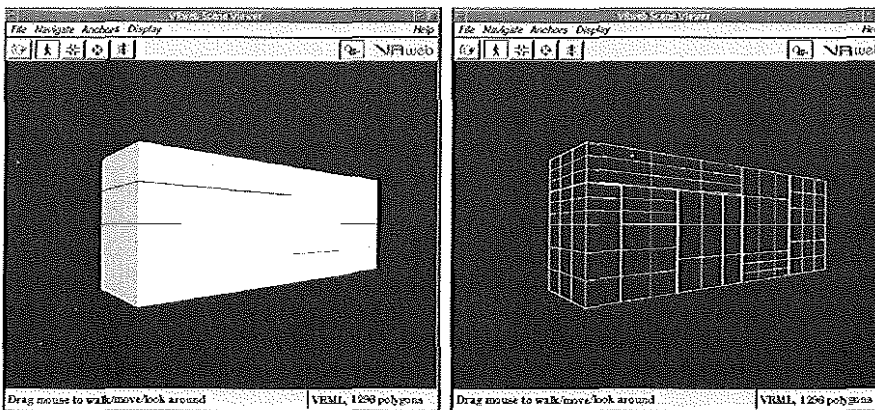


Fig. 16. – Un assemblage de bloc et le maillage proportionnel à leur taille

Nous proposons, en première étape de ce travail, de réaliser une chaîne complète de traitements, associant un modèle architectural, une mesure des blocs, le maillage correspondant et sa visualisation sous VRML.

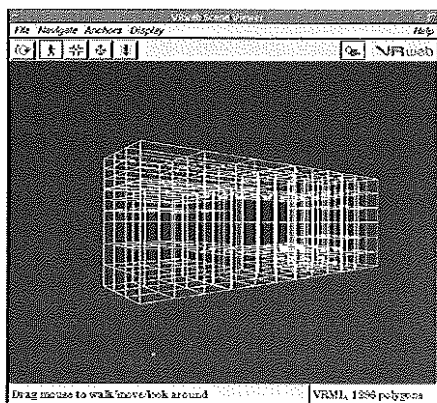


Fig. 17.- Visualisation 3D du maillage volumique

8. Perspectives

L'étude du patrimoine architectural est au confluent de plusieurs disciplines. Le besoin de proposer des méthodes de recherche interdisciplinaires s'impose donc à la plupart des acteurs impliqués dans son analyse.

La complexité et la multiplicité des questions que pose l'édifice patrimonial conduit naturellement à promouvoir de nouvelles méthodes d'investigation visant à favoriser sa compréhension et sa protection.

Ce projet se ramifie à présent au fil de nos préoccupations et des collaborations qu'il a suscitées, ces développements futurs se fédèrent autour d'un axe désormais identifié au laboratoire par l'acronyme MOMA : Mesures Optiques et Modèles Architecturaux. Nous vous présentons brièvement quatre directions de recherche issues du projet PAROS.

8.1. L'élaboration des modèles architecturaux

Nous appuyant largement sur les modèles architecturaux élaborés au GAMSAU dans le cadre du projet PAROS, nous nous proposons

d'étendre le corpus des objets architecturaux modélisés et de formaliser plus avant les relations qui lient les entités au sein de l'édifice.

Par ailleurs nous nous proposons de relier deux aspects importants de ce modèle :

- la notion de persistance : la formalisation objet du corpus sera intégrée aux fonctions de gestion de données grâce à l'utilisation d'un SGBD objet. Le système choisi est celui développé par la société *O2 Technology* : *O2*. Ce logiciel nous permet d'exploiter les développements existants en C++ et d'y adjoindre une composante base de données;
- l'expression graphique 3D de la morphologie des entités et de leur composition. Chaque entité architecturale sera capable d'exprimer sa morphologie au travers d'un modèleur 3D. Ici notre choix s'est porté sur le modèleur de la société *Bentley* : *MicroStation*.

Le lien projeté entre la représentation 3D de l'entité et son modèle informatique passe par la réalisation d'un lien logiciel entre le modèleur *MicroStation* et le SGBD *O2*. Ce lien nous permettra, outre de visualiser la morphologie de chacune des entités et d'avoir accès aux informations non dimensionnelles, de simuler le comportement de l'entité architecturale dans l'édifice. Le lien entre le modèle et une de ces expressions graphiques permettra d'accéder depuis le graphique à l'ensemble des informations modélisées (forme, comportement et relations inter-entités).

8.2. Vers un outil didactique

Réalisé en collaboration avec l'*Institute of History of Art and Monument Preservation Cracow University of technology – Faculty of architecture*, l'objectif est ici l'expérimentation d'un outil d'information et de connaissance utilisant les technologies W3 pour fédérer et donner à voir le modèle architectural, noyau d'une représentation interdisciplinaire.

La plate-forme recherchée sera dédiée à la formalisation et à l'échange de connaissances relatives au patrimoine architectural. Le cas du *ratusz Krakowski*, hôtel de ville de Cracovie dont ne subsiste aujourd'hui que le beffroi, doit permettre la mise en place des mécanismes d'échange de données et de formalisation des connaissances au travers d'un cas concret, débouchant sur la reconstitution des évolutions architecturales de l'édifice depuis l'époque romane.

Ce programme a pour vocation, au travers du développement d'une plate-forme d'investigations scientifiques partagée sur Internet, de promouvoir un outil d'étude évolutif fédérant les représentations du patrimoine architectural propres à chaque discipline.

8.3. Le lien avec l'outil de mesure

Nous proposons de développer un outil de restitution photogrammétrique dédié à l'architecture. L'outil de restitution est dédié à un corpus architectural identifié et formalisé dans l'axe MOMA. Le processus de mesurage projeté repose sur le fait que la morphologie des objets mesurés est connue *a priori*. Il s'agit donc de guider un processus de restitution photogrammétrique par une formalisation des connaissances architecturales.

L'intervention des connaissances formalisées se situera à plusieurs niveaux :

- une fois l'entité architecturale identifiée, l'opérateur se verra proposer un choix de primitives géométriques pertinentes pour la mesure ;
- après un minimum de mesure sur l'entité, pour chacune des primitives, le système guidera l'opérateur en anticipant le pointé ;
- outre l'ensemble de connaissances relatives à la morphologie des entités, le système pourra utiliser la connaissance des relations entre entités et ainsi proposer des positions pour chacune d'elles.

L'intérêt d'un lien étroit entre connaissances et mesurage sera visible dans plusieurs directions :

- la saisie des entités pourra, si on le désire, être particulièrement allégée, voire se limiter à une vérification rapide du modèle sous-jacent ;
- l'outil de mesure, un système de photogrammétrie, permettra d'évaluer rapidement la pertinence du modèle tant au niveau structurel (interrelation entre entités, mise en évidence de pathologies) qu'au niveau des irrégularités de surface (évaluation de dégradations locales).

Ces développements se feront en collaboration avec la division photogrammétrie du LERGEC, Laboratoire d'Études et de Recherches en GÉnie Civil – École Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, sous la direction de M. Pierre Grussenmeyer.

8.4. L'apport d'un système d'information

Le lien entre les données graphiques aux différentes échelles (de l'édifice au tissu urbain) et les informations patrimoniales recueillies est particulièrement adapté à la mise en scène des connaissances formalisées sur la ville et ses édifices. Nous aborderons les thèmes suivants :

- formalisation des connaissances architecturales et patrimoniales ;
- expression morphologique du bâti au travers d'outils de représentation 3D et d'outils cartographiques ;
- exploitation du lien entre les données architecturales ou patrimoniales modélisées et leurs expressions morphologiques permettant de mettre en scène un ensemble de connaissances :
 - visualisation de l'évolution de la cité,
 - visualisation de l'évolution des connaissances sur la cité,
 - tracé d'itinéraires thématiques guidés par les connaissances patrimoniales.

Notre approche est ici fondée sur la liaison d'un ensemble de connaissances patrimoniales formalisées par une approche objet aux diverses expressions graphiques de la ville (cartographie 2D, volumétrie simplifiée, modèle 3D des édifices étudiés).

Bibliographie

- ADAM (Jean-Pierre) : 1980, *La Construction romaine, Matériaux et techniques* (Paris : Édition A. et J. Picard).
- ADAM (Jean-Pierre) : 1994, *Le Temple de Portunus au forum Boarium* (Palais Farnèse, 1994.) (Paris : de Broccard, « Collection de l'École française de Rome »).
- BROWN (Frank Edward) et RICHARDSON (Emeline Hill) : 1960, *Cosa II. The temple of the Arx* (American Academy in Rome, « Memoris XXVI »).
- CAGNAT (R.) et CHAPOT (V.) : 1920, *Manuel d'archéologie romaine, tome I, Les monuments, décorations et sculptures* (Paris : Auguste Picard).
- COARELLI (Filippo) : 1994, *Guide archéologique de Rome* (Paris : Hachette, collection « Bibliothèque d'archéologie »).
- COËTMEUR (Alain) : 1992, « Bison++ et Flex++ » (R&D, département informatique, CDC. En annexe à [Donnelly, 1992]).
- DAREMBERG (Ch.) : 1887, *Dictionnaire des antiquités grecques et romaines* (Paris : Edm. Saglio, Lizenzausgabe der 1887 lei der Librairie Hachette).

- DONNELLY (Charles) et STALLMAN (Richard) : 1992, «Bison, the YACC-compatible Parser Generator» (Bison, Version 1.20) (Cambridge USA : Free Software Foundation).
- FLEURY (Philippe) : 1995, « Vitruve et le traité d'architecture » (XXVIII^e Congrès A.P.L.A.E.S. Association des Professeurs de Langues Anciennes de l'Enseignement Supérieur, Saint-Étienne du 19 au 21 mai 1995) (Saint-Étienne : Publication de l'Université de Saint-Étienne).
- FLORENZANO (Michel), BLAISE (Jean-Yves) et DRAP (Pierre) : 1995, « PAROS, le sens de la mesure. Du relevé photogrammétrique à la représentation de l'architecture construite », l'interface des mondes réels et virtuels, Montpellier, Juin 1995, actes du colloque.
- FLORENZANO (Michel), BLAISE (Jean-Yves) et DRAP (Pierre) : 1996a, «PAROS, le sens de la mesure. Photogrammétrique et modèles architecturaux : le cas du forum antique de la ville d'Arles», XVIII^e congrès de l'ISPRS, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienne (Autriche) juillet 1996, in *Les Archives Internationales de Photogrammétrie et de télédétection*, volume XXXI, tome B5, commission V, p. 167-172.
- FLORENZANO (Michel), BLAISE (Jean-Yves) et DRAP (Pierre) : 1996b, «PAROS, Photogrammétrique Architecturale et Restitution par Outils de Synthèse», *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, volume 11, n^o 4/1996 (Paris : Hermès), p. 345-361.
- FLORENZANO (Michel), BLAISE (Jean-Yves) et DRAP (Pierre) : 1997a, «PAROS, modèles objet appliqués à l'étude de l'architecture construite», *L'Objet, Logiciel, base de données, réseaux*, volume 3, n^o 1/1997 (Paris : Hermès), p. 27-52.
- FLORENZANO (Michel), BLAISE (Jean-Yves) et DRAP (Pierre) : 1997b, «PAROS-Photogrammetry and architectural models. Experiencing a knowledge-based approach to architectural photogrammetry», *Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology* (Birmingham, UK, 10-12 avril 1997).
- GINOUVÈS (René) et MARTIN (Roland) : 1985, *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine, tome I, Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décors* (Édition : École française de Rome N 84, Diffusion de Broccard, 11 rue de Médicis 75006 Paris).
- GINOUVÈS (René) : 1992, *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine, tome II, Éléments constructifs : supports, couvertures, aménagements intérieurs* (Édition : École française de Rome N 84) (Paris : de Broccard).
- GROS (Pierre) : 1996, *L'Architecture romaine du début du III^e siècle av. J.-C. à la fin du Haut-Empire, tome 1, Les monuments publics* (Paris : Picard, Collection «Les manuels d'art et d'archéologie antiques», ouvrage publié avec le concours du CNRS et du Centre national du livre).

- GUÉNA (François) : 1995, « Une application du raisonnement par classification à la conception d'objets composites », LMO'95 : *Langages et Modèles à Objets* (Nancy, 12 et 13 octobre 1995, actes, p. 35–51).
- HATON (Jean-Paul), BOUZID (Nadjet), CHARPILLET (François), HATON (M.-C.) et NAPOLI (Amédéo) : 1991, *Le Raisonnement en intelligence artificielle, modèles, techniques et architectures pour les systèmes à base de connaissance* (Paris : InterÉditions).
- MARINO-DREWS (Olga) : 1993, *Raisonnement classificatoire dans une représentation à objet multi-point de vue* (Thèse de l'Université, J. Fourier, Grenoble 1).
- PLATNER (Samuel Ball) : 1965, *A topographical dictionary of ancient Rome* (Roma : edizione Anastatica, L'Erma di Bretschneider).
- RICHARDSON (L.), *A new topographical dictionary of ancient Rome* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London).
- VITRUVÉ : 1988a, *Les dix livres d'Architecture* (Traduction de Claude PERRAULT, 1684 ; édition Pierre Mardaga).
- VITRUVÉ : 1988b, *Les dix livres d'Architecture* (Texte, traduction et analyse. Traduction d'Auguste CHOISY. Édition F. de Nobele).
- VITRUVÉ : 1990a, *De l'architecture, Livre I* (Texte établi, traduit et commenté par Philippe Fleury, Paris : Les Belles Lettres, collection des universités de France, sous le patronage de l'association Guillaume Budé).
- VITRUVÉ : 1990b, *De l'architecture, Livre III* (Texte établi, traduit et commenté par Pierre GROS, Paris : Les Belles Lettres, collection des universités de France, sous le patronage de l'association Guillaume Budé).
- VITRUVÉ : 1990c, *De l'architecture, Livre IV* (Texte revu et corrigé par L. Callebat et Pierre Gros, Paris : Les Belles Lettres, collection des universités de France, sous le patronage de l'association Guillaume Budé).