

Approche paramétrique pour la reconstitution 3D basée sur la connaissance préalable

Hayet Kadi*
Karima Anouche

Département d'Architecture, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie
*hayet.kadi@gmail.com

Résumé

Dans le cadre de la documentation du Patrimoine, la reconstitution numérique a stimulé depuis quelques années le développement et l'implémentation de plusieurs techniques et logiciels. En effet, le balayage laser et l'évolution de l'imagerie démocratisent l'accès aux données et améliorent la capacité de partager et d'interpréter l'information patrimoniale dans le monde entier. L'acquisition 3D a connu elle un progrès significatif grâce à l'introduction de capteurs laser, mais des difficultés aussi pour exploiter de façon efficace les données acquises. Nous proposons une approche méthodologique de reconstitution 3D basée sur la connaissance préalable dont l'interprétation informatique sert à structurer les données relevées. Il s'agit d'interprétations paramétriques décrivant l'objet et les relations morphologiques de ses parties, permettant de générer des modèles consistants et réutilisables. Ce processus de reconstitution, que l'on veut généralisable, est explicité à travers un exemple; la finalité n'étant pas la modélisation en soi mais la description de ses différentes phases.

Mots-clés

Reconstitution 3D
Documentation du patrimoine bâti
Photogrammétrie
Relevé laser
Modélisation paramétrique

Abordagem paramétrica para a reconstituição 3D baseada no conhecimento prévio

Resumo

No contexto da documentação do Património, a reconstituição digital, desde há alguns anos, originou o desenvolvimento e implementação de diversas técnicas e de diverso software. Com efeito, o varrimento laser e a evolução da imagiologia democratizaram o acesso aos dados e melhoraram a capacidade de partilha e de interpretação da informação patrimonial no mundo inteiro. A aquisição 3D, ela própria, conheceu um progresso significativo graças à introdução de sensores laser, mas também teve dificuldades para explorar de modo eficaz os dados adquiridos. Propomos uma abordagem metodológica de reconstituição 3D baseada no conhecimento prévio em que a interpretação informática serve para estruturar os dados adquiridos. Trata-se de interpretações paramétricas que descrevem o objecto e as relações morfológicas entre as suas partes que permitem gerar modelos consistentes e reutilizáveis. Este processo de reconstituição, que se pretende generalizar, é explicado através de um exemplo que tem como objectivo não a modelização em si, mas a descrição das diferentes fases.

Palavras-chave

Reconstituição 3D
Documentação do património edificado
Fotogrametria
Varrimento laser
Modelização paramétrica

ISSN 2182-9942



Parametric approach for prior knowledge-base 3D reconstruction

Abstract

Within the framework of Heritage documenting, digital reconstruction has stimulated, since years, the development and implementation of many techniques and software. Indeed, laser scanning and advances in imaging and photography are democratizing access to data and improving the ability to share and interpret Heritage information over the world. 3D acquisition knew a significant progress thanks to the introduction of laser sensors, but is also having problems related to exploiting the acquired data. We propose a methodological approach of 3D reconstruction, based on prior knowledge whose computer interpretation serves to structure the acquired data. It is about parametric interpretations describing the object and the morphological relations of its parts, allowing the generation of consistent and reusable models. This reconstitution process we want generalizable is explicated through an example; the finality not being the modeling in itself but the description of its different phases.

Keywords

3D Reconstruction
Built-heritage
documenting
Photogrammetry
Laser scanning
Parametric modeling

Introduction

Les nouvelles technologies telles que les *terrestrial laser scanners* (TLS), les progrès de l'imagerie et de la photographie, et d'autres techniques spatiales renforcent grandement les capacités de conservation et de recherche sur le patrimoine. Ces technologies sont en train de démocratiser l'accès aux données et d'améliorer la capacité de partager et d'interpréter les informations archéologiques et architecturales dans le monde ainsi que la création de nouveaux domaines de l'intégration de la recherche. Ceci motive le développement et l'adoption d'outils et de méthodes qui créent, en trois dimensions des représentations interactives 3D avec beaucoup plus de contenu informationnel, de robustesse visuelle, de fiabilité scientifique, de durabilité, et de réutilisation future que les solutions d'archivage numériques basiques.

Ce projet vise à formaliser l'aide que peuvent représenter les outils informatiques pour l'extraction de connaissances architecturales, l'acquisition de données 3D et leur exploitation ainsi que la communication du savoir qu'elles représentent et ce dans le but d'une reconstruction 3D pertinente. Notre approche repose sur une modélisation dite paramétrique correspondant aux éléments prédéfinis d'après la description sémantique de l'objet.

Ce processus répond à diverses préoccupations : premièrement, la conservation et l'archivage des données patrimoniales, constituées de restitutions 3D et des sources documentaires plus ou moins anciennes ; deuxièmement, l'analyse et la comparaison de données selon divers points de vue dictés par les domaines d'étude, et enfin la valorisation des données archivées, afin de partager avec le public les connaissances du patrimoine historique. Outre le but éducatif de l'histoire, la finalité de cette modélisation numérique répond à la nécessité de modèles exploitables pour des projets de simulation, de prototypage, d'exposition, de promotion du tourisme culturel, et notamment pour l'archivage contre toute catastrophe probable et comme outil d'aide à la formulation de nouvelles configurations.

Aperçu et méthodes

Tous les domaines de la conception confrontés à un réel physique existant peuvent aujourd'hui faire appel aux techniques d'acquisition tridimensionnelle afin de reconstituer de manière numérique la morphologie et la position d'objets existants. L'intégration dès la saisie, des données tridimensionnelles permet ainsi d'assurer la gestion, le traitement, les analyses, les simulations et la représentation graphique des espaces bâtis existants.

Les résultats de ces expériences témoignent de la qualité croissante de ces outils (précision et vitesse) mais aussi des difficultés rencontrées pour exploiter de façon efficace les données acquises. Les travaux de recherche s'orientent donc dans deux directions, d'une part sur l'automatisation du processus de relevé avec comme ambition d'améliorer la pertinence de l'acquisition et d'autre part sur le traitement des données. Ces techniques d'acquisition souvent fastidieuses et quelque part défailtantes, sont de plus en plus combinées en vue d'obtenir des modèles plus précis.

La photogrammétrie permet de construire rapidement les parties principales d'un bâtiment, alors que pour les objets détaillés et complexes (volutes, voûtes) un grand nombre d'images et/ou de points correspondants sont exigés, augmentant le temps de modélisation [1]. Mueller a conçu une méthode pour une reconstruction rapide de façades à partir de photos redressées [2]. Il calcule des lignes droites horizontales et verticales pour la création d'éléments de forme simple (boîte), et l'utilisateur rentre la profondeur des éléments. Cependant leur méthode convient aux façades simples modernes des bâtiments mais n'est pas adaptable aux façades architecturales complexes.

Les techniques de Lasergrammétrie produisent des nuages de points d'une grande précision [3]. Cependant la tâche de modélisation est pénible et seulement des objets géométriques simples (sphère, cube, plan, cylindre) peuvent être automatiquement créés. L'approche de Boulassal vise à segmenter automatiquement et extraire

des surfaces planes à partir d'une façade de bâtiment capturé par TLS, et ce en se basant sur l'algorithme RANSAC [4]. La modélisation a concerné les parties visibles capturées, vu qu'il s'agit de façades simples. Afin de modéliser une colonne papyriforme égyptienne, Hassoun a développé une application en SGDLsoft [5]. Cette proposition se fonde également sur une connaissance approfondie des règles géométriques de conception de cet élément architectural, cependant ne pouvant être extrapolée à d'autres objets analogiques.

Des objets paramétriques sont maintenant disponibles dans des bibliothèques, pour des domaines spécifiques (structure métallique, industrie, mécanique...) mais aucune bibliothèque architecturale n'existe. Dans ce contexte, une approche favorisant davantage le processus typologique, a été proposée par Charbonneau pour l'interprétation et la diffusion d'un corpus de roses gothiques [6]. Un outil qui s'apparente plutôt à un thesaurus graphique, sans confrontation dimensionnelle à l'objet réel.

Bien différents dans leur procédé et leur utilisation, la modélisation de l'information du bâtiment (BIM) est plus un processus dans lequel le modèle numérique du bâtiment tient compte de feuilles de données, tandis que le principal concept de modélisation paramétrique (MP) est de définir des géométries à l'aide d'un codage. Dans le cadre du système BIM, l'industrie du bâtiment est en besoin constant d'informations qui complètent les différents plans fournis avec le projet, au détriment d'une meilleure adaptation et optimisation de la forme qu'offre la MP. Denis voit que la combinaison des deux concepts amènerait à un design mieux informé dans lequel toutes les informations contenues dans le projet ne sont pas uniquement utilisées pour identifier les éléments mais bien comme aide à la conception, à la prise de décisions [7]. Boeykens voit le même intérêt de les combiner en vue de profiter de leurs différences inhérentes [8]. Tandis que le modèle BIM est toujours lié à l'évaluation des performances basée sur des informations structurées dans le modèle de bâtiment, la création du modèle numérique elle, s'appuie sur les paradigmes de modélisation paramétrique, où l'intention de conception et les flux d'informations externes peuvent être capturés pour générer des modèles.

Représentant les caractéristiques physiques et fonctionnelles des bâtiments, le BIM est essentiellement utilisé dans la conception et la gestion de nouveaux bâtiments, plutôt que dans le domaine du patrimoine culturel, où peu de recherches focalisent sur la possibilité de son application. L'une des limitations étant le manque d'objets paramétriques dans la bibliothèque du logiciel BIM. En effet, le concept HBIM désigne la représentation BIM de l'état de conservation d'un bâtiment, et implique trois aspects: la modélisation géométrique du composant, l'attribution de catégories et de propriétés matérielles aux composants et enfin l'établissement de relations entre eux. Murphy a conçu un plug-in HBIM qui contient une bibliothèque d'objets paramétriques pouvant être

utilisés pour modéliser avec précision l'architecture de style classique pour les applications patrimoniales [9]. Il présente une modélisation semi-automatique de façades de bâtiment en utilisant une grammaire de forme pour créer une façade paramétrique qui positionne automatiquement les éléments en fonction des règles architecturales et des proportions. L'approche fort intéressante par la liste d'objets créée, reste insuffisante quand à l'automatisation et la génération de nouvelles configurations, mais aussi son application à des architectures complexes. Notre objectif hormis une bibliothèque d'objets qui correspondrait plutôt aux éléments difficilement décrits par une géométrie (statuaire, décors, bas-reliefs...) est celui d'offrir des outils d'aide à la modélisation et qui se traduiraient par des fonctions et commandes à intégrer dans un menu d'interface paramétrique. L'aspect principal du système HBIM est d'autant plus l'offre d'une plateforme de collection et de gestion de données et d'objets patrimoniaux, que l'on néglige un peu la pertinence et la précision exigées par la reconstitution 3D.

Pour la segmentation automatique des nuages laser, Beinat propose une méthode pour détecter directement les discontinuités (segmentation) et pour estimer successivement les paramètres de chaque surface reconnue (classification) [10]. L'algorithme basé sur l'estimation locale des dérivées partielles d'expansion de Taylor, exploite les valeurs de courbure: les contours de discontinuité sont caractérisés par des points ayant une courbure moyenne supérieure à un seuil, tandis que la classification est réalisée par une analyse de cluster de points ayant des valeurs de courbure homogènes. Les valeurs de courbure estimées permettent la détection automatique des singularités dans les nuages: les points de liaison sont mis en évidence en analysant les courbures

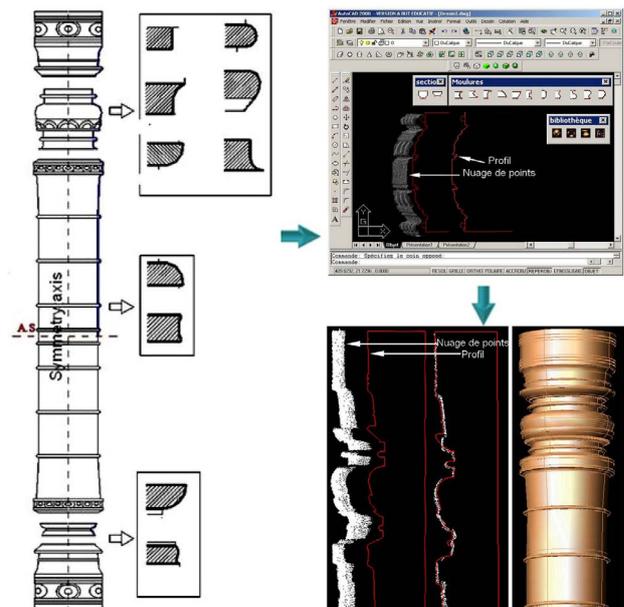


Figure 1. Moulures extraites et combinées en un profil à ajuster sur le nuage de points pour un Modèle 3D (Colonne Prei kmeng, Musée Guimet, France).

Gaussiennes locales, tandis que les points de bord résultent en évaluant les courbures moyennes. Dans notre cas, ce traitement de données laser brutes synthétiques permettant la reconnaissance de certains points et segments, pourrait parfaitement répondre à notre besoin de référencement dicté par les points d'ancrage nécessaires pour l'éventuel ajustement des objets 3D envisagés sur le nuage.

Nos recherches entamées avec un précédent projet lié à la modélisation 3D d'objets architecturaux Khmers, ont été basées sur des nuages de points acquis par laser, des photographies et des règles architecturales théoriques de l'objet à modéliser afin de créer automatiquement des modèles 3D qui peuvent être ajustés de façon interactive. L'étude de l'architecture khmère s'est concentrée tout d'abord sur la classification des colonnes en fonction de leurs plans, et leur constitution géométrique et structurelle. La recherche d'éléments répétitifs qui composent les colonnes révèle les moulures comme étant les primitives géométriques qui ont été identifiées par une forme et des attributs (Figure 1).

Ces moulures formalisées depuis la synthèse de l'étude théorique des colonnes khmères ont conduit à la structuration des données mesurées (nuage de points) vers une modélisation considérablement accélérée et certainement plus pertinente. Cependant, la construction basée sur des primitives semble fastidieuse quand il s'agit de la modélisation d'un bâtiment complexe. L'approche devait remédier à la difficulté de décrire des formes complexes dans un langage informatique, et être développée en tenant compte de toutes les opérations devant être appliquées à un modèle.

La technique d'acquisition laser a été adaptée à ce type de projet, mais le processus de modélisation fût beaucoup plus lent. Il nous a donc paru judicieux d'orienter la recherche vers le domaine de la modélisation architecturale. Nous comptons donc sur une méthodologie basée d'une part, sur une étude analytique des objets afin de formaliser des outils pour aider la modélisation, et d'autre part sur l'extraction de l'information 2D et la mesure appliquée à l'objet afin d'atteindre une application concrète.

Approche proposée

Principe

Afin de représenter les connaissances et de développer des moyens d'intervention, nous devons assumer la disponibilité préalable d'un modèle d'objet qui contiendra les différents traitements. Cependant, la modélisation d'un objet architectural existant indépendamment de son échelle (du bâtiment au territoire) pose le double problème de la mesure (morphologie et emplacement) et la modélisation des connaissances disponibles sur ce sujet. La condition sine qua non d'un modèle architectural pour la mesure et toutes les données collectées devraient

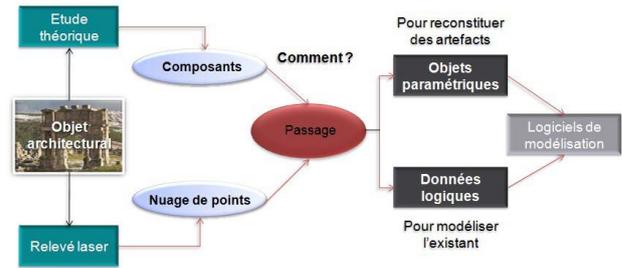


Figure 2. Principe du processus de reconstruction 3D.

être exploitée pour le développement d'outils numériques. La création de tels outils nécessite des recherches sur la structuration de l'information et la modélisation, la mise en œuvre de logiciels de consultation et d'outils de diffusion.

Si la forme architecturale est associée à une description sémantique, le bâtiment peut être considéré comme un système de connaissances. Depuis l'observation et la connaissance de l'objet réel, il est possible de définir un modèle décrivant le bâtiment, les relations morphologiques de ses parties, ses règles géométriques et de la connaissance de l'objet. L'outil numérique permet enfin la conception du modèle de la connaissance en tant que soutien de différentes représentations basées sur des informations géométriques et l'interprétation des données.

Le présent projet vise une approche méthodologique explicite en faveur d'une reconstruction et conception pertinente de modèles 3D. Il traite de la modélisation 3D basée sur la connaissance préalable. Notre démarche consiste, à partir de la numérisation et de la reconstitution réalisées sur des édifices existants, à expliciter les données et informations nécessaires à sa réalisation : photos, mesures, relevés, édifice par édifice mais aussi l'ensemble du corpus architectural stylistique, les grammaires de formes à utiliser pour tant en alléger la réalisation qu'en assurer la robustesse historique (Figure 2).

La formalisation de l'approche consiste d'abord à représenter les diverses formes d'objets et d'en extraire les composants, et doit identifier les paramètres décrivant leur géométrie. La mise en œuvre de ces objets paramétriques dans un environnement graphique, conduit à une modélisation 3D qui forme un langage dont le vocabulaire serait constitué d'entités géométriques et la grammaire de règles combinatoires spécifiques.

Dans notre cas, nous procéderons, in situ au balayage laser de l'objet choisi (la photogrammétrie ou autre technique pourrait s'appliquer); le traitement initial du nuage de point se faisant automatiquement dans le logiciel afférent au capteur. Bien que notre objectif principal soit le paramétrage en vue de numériser les connaissances architecturales, le besoin de quelques points de référence de l'objet incite à la segmentation du maillage 3D acquis par laser. Cette piste déjà initiée par Lari permet l'extraction de quelques références pouvant

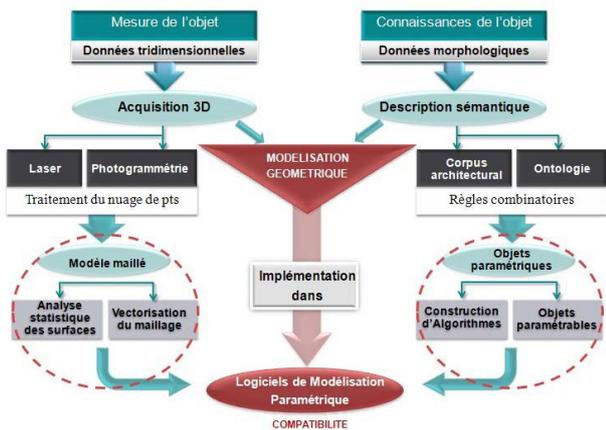


Figure 3. Schéma de l'approche adoptée.

servir de points d'ancrage lors de l'ajustage des objets paramétriques [11].

Ces composants informatisés peuvent également servir à concevoir de nouveaux objets architecturaux grâce à de multiples combinaisons et modifications proposées. Cela pourrait être possible grâce au système de paramétrage. À ce niveau, aucune acquisition 3D n'est nécessaire; La modélisation étant uniquement basée sur la manipulation numérique. En clair, le processus de reconstitution proposé pourrait se schématiser montré dans la Figure 3.

Tout comme la conception architecturale, la reconstitution du patrimoine doit faire appel à ces nouvelles démarches collaboratives de plus en plus demandées en vue

d'un produit fiable et pertinent. D'une part, notre modélisation paramétrique consistant à se préoccuper davantage de l'aspect formel de l'objet, en travaillant directement sur la géométrie à travers un programme sans avoir à passer par des objets standardisés, mais qui elle, permet de produire une infinité de formes architecturales. D'autre part, l'intention de s'insérer dans une approche collaborative. En effet, la recherche d'automatisation de la modélisation et la génération de modèles à partir d'un minimum de données en évitant le cas-par-cas, dicte la nécessité de se focaliser sur la construction la plus fidèle du modèle 3D en se basant sur la notion de paramétrage. Cependant, l'intégration dans le processus BIM constitue le prolongement de notre démarche.

Nous rappelons notre objectif qui vise l'automatisation du processus de reconstruction 3D d'objets patrimoniaux relevés au laser, où la recherche de l'aspect volumique « tel que construit » prime. Notre objectif tend à structurer les données 3D acquises en se basant sur la connaissance architecturale de l'objet. Ceci est d'autant plus une phase primordiale et un moyen rapide et pertinent de protection d'un patrimoine, qu'un recours à l'intervention ponctuelle contrainte tant par l'aspect technique que financier et même administratif.

Ceci ne nous laisse cependant guère indifférents à la volonté de participer à gestion de notre patrimoine. En effet, nous nous sommes interrogés sur le devenir de notre modèle après validation, dont l'usage ne pourrait servir qu'une simple documentation ou un enseignement. Hormis son paramétrage et sa réutilisation soit pour reconstituer d'autres objets homologues, soit pour en

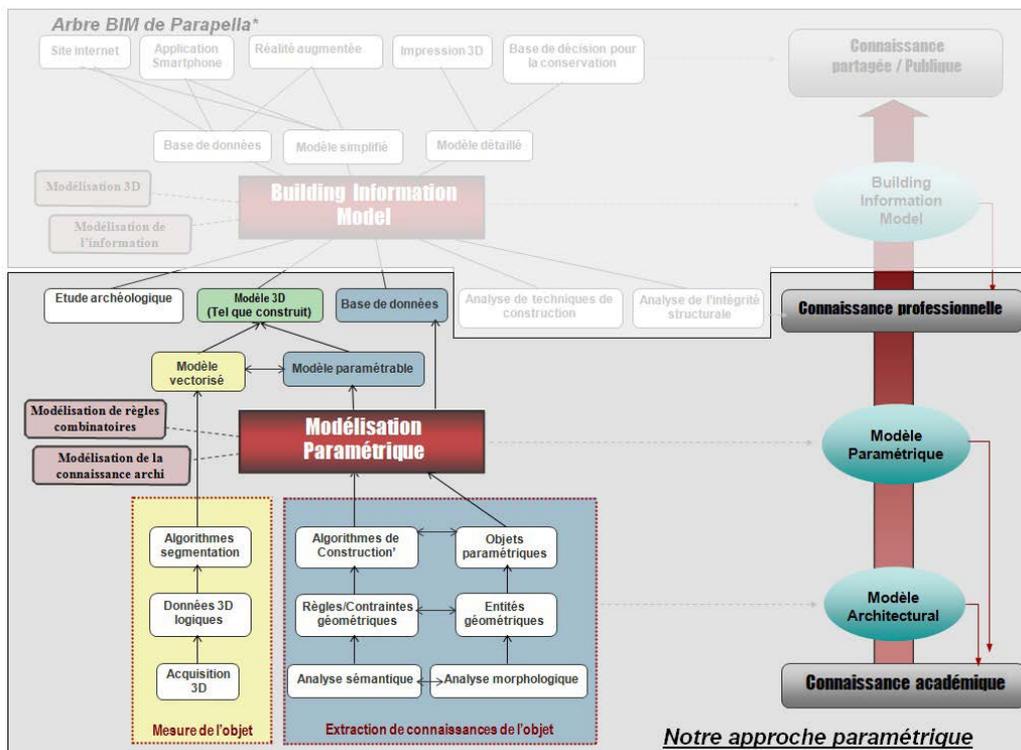


Figure 4. Schéma général du positionnement de notre approche dans le processus BIM.

concevoir de nouvelles configurations, nous avons pensé à la possibilité d'intégration de notre outil dans une plate-forme BIM pour l'accès et l'usage du modèle dans différentes études multidisciplinaires (Figure 4).

Champ d'application

L'approche fait appel à l'étude d'un objet emblématique de l'architecture romaine ; l'arc de triomphe caractérisé par la robustesse de la construction et le décor incomparable lui donnant une valeur patrimoniale indéniable. Hormis le but de reconstruire un patrimoine pour sa sauvegarde, l'étude de cet objet approprié peut offrir une lecture modélisant comparative en opérant un zoom sur ses composants architectoniques et détails à travers de nombreuses localités. Un objectif spécifique réside dans l'extrapolation vers d'autres arcs romains.

Ayant fait partie de l'extension de l'Empire romain, l'Algérie possède un riche patrimoine ancien qui a été déjà exploré et illustré en partie par l'administration française. Basé sur des arcs de triomphe algériens, l'analyse devrait être étendue à d'autres arcs romains, aux fins de comparaison en cas de lacunes documentaires.

Mise en application de l'approche et résultats

Afin de mener à bien ce projet, on prévoit un programme d'étude en trois temps :

- La consignation dans une table de données de tous les documents existants concernant les objets en

étude, puis son exploitation et l'élaboration d'un modèle architectural de chaque élément distinctif, travail en cours, y compris l'élaboration de plans 2D.

- D'autre part, l'informatisation de la connaissance architecturale, par la traduction algorithmique des composants de base extraits en analyse. Il s'agira dans cette phase de définir un modèleur et langage de programmation adaptés à la notion de paramétrage.
- En parallèle de l'analyse sémantique, devoir procéder à des acquisitions 3D de quelques objets en guise d'expérimentation. La combinaison de ces mesures avec les outils développés permettrait la validation et l'amélioration de l'approche.

Structuration de la connaissance architecturale

Il s'agit, à travers une analyse comparative de différents arcs, d'étudier cet élément du point de vue architectural et archéologique. L'étude morphologique devrait faire ressortir les composants de cet objet en vue de définir les primitives architecturales de base. La description sémantique qui consiste en l'étude et l'analyse de l'objet architectural afin d'en connaître les différentes formes et en extraire les composants, a pour objectif d'identifier les paramètres de chaque entité, permettant sa construction.

L'analyse de divers documents (ouvrages, travaux scientifiques, archives,...) a permis l'identification d'un nombre important d'arcs de triomphe classés en deux séries: porte monumentale correspondant à l'entrée d'une enceinte et arc honorifique isolé sur une place ou une voie. Quant à l'aspect typologique, quatre types d'arcs furent identifiés :

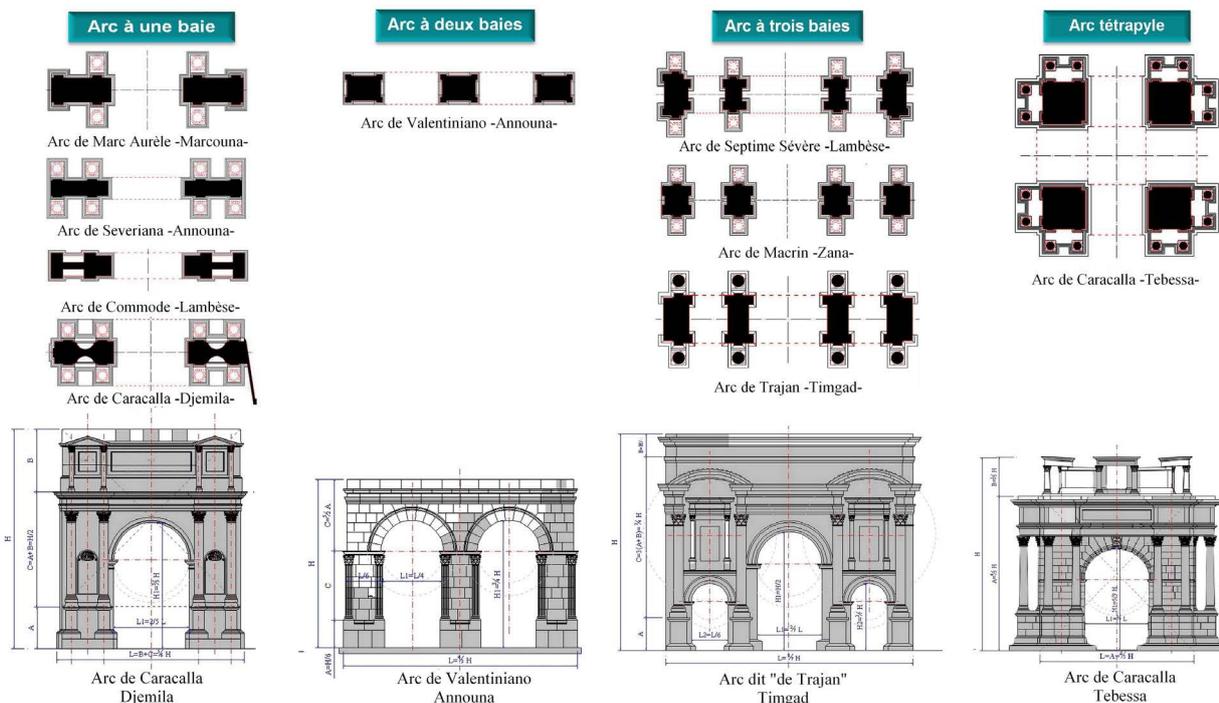


Figure 5. Élaboration du modèle 2D.

Table 1
 Répertoire des Arcs de triomphe en Algérie

N°	TYPE	DENOMINATION	CITE ROMAINE	NOM ACTUEL	DATATION	ETAT DE CONSERVATION	DOCUMENTS DISPONIBLES
1	Arc à 1 baies	<i>Arc de Caracalla</i>	<i>Cuicul</i>	Djemila	216	Bon état	Photos/ Gravure / plan
2		<i>Arc du Cardo</i>			IIe S. (les Sévères)	Bon état	photo
3		<i>Arc de Commode</i>	<i>Lambaesis</i>	Lambèse (Tazoult)	184-185	Partiellement détruit	Plan / photo
4		<i>Porte de Lambèse</i>			Sous Commode	Partiellement détruit	photo
5		<i>Arc dit « d'El Ghouassa »</i>	<i>Thubursicum Numidarum</i>	Khamissa	IVè s	Partiellement détruit	Photo / Plan
6		<i>Porte du passage vers cour de la Basilique</i>	<i>Theveste</i>	Tébessa	Fin du IVè s	Partiellement détruite	photo
7		<i>Arc de Marc Aurèle</i>	<i>Diana Veteranorum</i>	Zana	164-165 (165Gsell)	Bon état	Dessin / plan / photo / Gravure
8		<i>Porte d'entrée au temple de Diane</i>			IIIe siècle	Partiellement détruite	Plan / photo
9		<i>"Arc de Severiana "</i>	<i>Thibilis</i>	Announa	Période des Sévères	Bon état	Plan / photo / Gravure
10		<i>Arc de Marc Aurèle et Lucius Verus</i>	<i>Verecunda</i>	Marcouna	162	Partiellement détruit	Plan / photo
11		<i>Arc de Marc Aurèle</i>			172	Partiellement détruit	Photo / Gravure / plan
12		<i>Porte du Nord ou Porte de Memmius</i>	<i>Castellum Tidditanorum</i>	Tiddis	209-212	Bon état	Photo
13	Arc à 2 baies	<i>Porte double : "Arc de Valentiniano "</i>	<i>Thibilis</i>	Announa	375-378	Partiellement détruit	Plan / photo / Gravure
14		<i>Arc dit « de Trajan »</i>	<i>Thamugadi</i>	Timgad	203	Bon état	Détail / croquis / plan
15	Arc à 3 baies	<i>Arc de Septime Sévère et Caracalla</i>	<i>Lambaesis</i>	Lambèse (Tazoult)	203	Bon état	Croquis / plan/ photo
16		<i>Arc d'entrée du Forum Novum</i>	<i>Thubursicum Numidarum</i>	Khamissa	IVe S.	Partiellement détruit	photo
17		<i>Arc de Macrin</i>	<i>Diana Veteranorum</i>	Zana	217	Bon état	Dessin / plan / photo
18	Tétrapyle	<i>Arc de Caracalla</i>	<i>Theveste</i>	Tébessa	213-214	Bon état	Gravure / plan / photo

arc à une baie, arc à 2 baies, arc à 3 baies, tétrapyle avec 4 piédroits formant une base carré [12]. L'élaboration d'une liste (Table 1) a fait appel à des travaux antérieurs liés à l'antiquité romaine; les plus utiles à notre étude étaient ceux de Delamare [13] et de Ravosié [14]. Afin de mettre à jour ces documents et d'actualiser la liste de Frothingham [15], une enquête sur site a été importante pour valider encore certaines données extraites du répertoire architectural d'Engramma par Paronuzzi [16].

L'étude de cet objet architectural vise l'élaboration dans un premier temps d'un modèle 2D et ce en restituant les façades et plans de chaque édifice en faisant appel à la technique de photogrammétrie. Hormis quelques documents graphiques disponibles (croquis, plans), cette opération repose sur des données textuelles ainsi que sur des données terrain (Figure 5).

Cette phase a fait appel entre autres à la photogrammétrie architecturale, en vue de restituer les plans et façades des arcs étudiés. Ce modèle 2D à restitué ne servant qu'à l'extraction de composants, et devant être remesuré ultérieurement, ne requiert pas des appareils précis. En effet, l'usage d'un appareil numérique ordinaire d'une bonne résolution et privilégiant une faible sensibilité (100 ISO) pour une meilleure netteté, pourrait

suffire. Pour notre cas, et pour éviter la calibration, un reflex (Canon EOS 5D) facilite le contrôle de paramètres, mais un Canon PowerShot A620 a aussi servi. En quête de modèle 2D en vue d'extraire les composants communs aux arcs, ImageModeler a suffi pour l'acquisition des données voulues, au détriment de son homologue PhotoModeler plus apte à créer des modèles 3D. Le traitement et le format final des plans et élévations basés sur cette actualisation photogrammétrique sur site et complétés par des archives graphiques et textuelles, ont toutefois été développés sous Autocad plus pratique à manipuler.

L'avantage majeur de la photogrammétrie est qu'elle nécessite très peu de matériel, et est relativement simple à mettre en œuvre, les logiciels de traitement restant très abordables. Cependant, elle fonctionne mieux avec un environnement et un éclairage contrôlés contrairement à la lasergrammétrie favorable au moindre éclairage. La photogrammétrie est fortement dépendante de l'état de surface d'un objet, selon qu'il soit transparent (problème de réflexion) ou uni (difficile à reconstruire). Sa précision est conditionnée également par la présence ou non d'objets en mouvement ou non statiques.

L'analyse des différents arcs doit faire ressortir les composants de base, la relation proportionnelle entre eux,

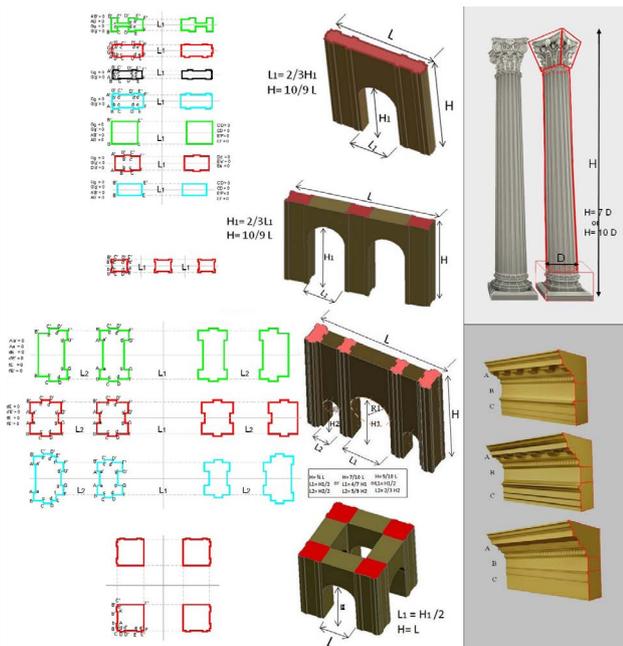


Figure 6. Extraction de paramètres.

ainsi que les analogies avec des arcs de même époque. Cette opération concerne tous les arcs en Algérie ainsi que certains en Tunisie et au Maroc, en vue de comparer leur morphologie et extraire les éléments variant et invariant. La décomposition de l'objet vise l'extraction d'entités communes à tous les arcs en vue d'identifier un chemin de reconstruction commun.

Il est impératif de noter que l'étude principalement axée sur la description d'une démarche visant l'automatisation et la pertinence de la modélisation, tente de focaliser sur l'exploitation et l'interprétation paramétrique de la connaissance

architecturale. Les données collectées sont assignées dans un premier temps dans des tables comme inventaire préliminaire, puisqu'il s'agira de le compléter dans le temps. Comme précédemment décrit, notre insertion BIM en vue, dictera la prise en charge de ces données et leur intégration dans une base. Cet article ne présente que notre vision paramétrique du modèle. En effet, l'étude théorique des différents types d'arcs a permis d'accumuler une somme de connaissances qui serait restaurée dans les outils développés.

Développement d'outils d'aide numériques

Cette étape consiste à numériser la connaissance architecturale extraite de la phase précédente. Il s'agit en premier lieu d'analyser profondément chaque composant de l'arc de Triomphe avec les différentes instances dégagées. Ceci permettrait ensuite d'identifier les paramètres régissant leur géométrie. La description géométrique sert à écrire les différentes formules algorithmiques correspondant chacune à une entité variante ou invariante (Figure 6).

Ce travail vise la construction d'objets 3D paramétriques qui une fois implémentés dans un environnement graphique permettrait la construction 3D de l'arc entier, en combinant ces objets paramétriques entre eux, par instanciation.

La visualisation de ces instances se traduit par l'attribution pendant la modélisation de valeurs aux entités géométriques définies. Pour chaque entité, la création des attributs et l'affectation de valeurs se fait à partir des modules développés au niveau du modelleur. L'utilisateur aura la possibilité de créer des attributs préconfigurés ou nouveaux. Les attributs sont à tout moment modifiables ou effaçables.

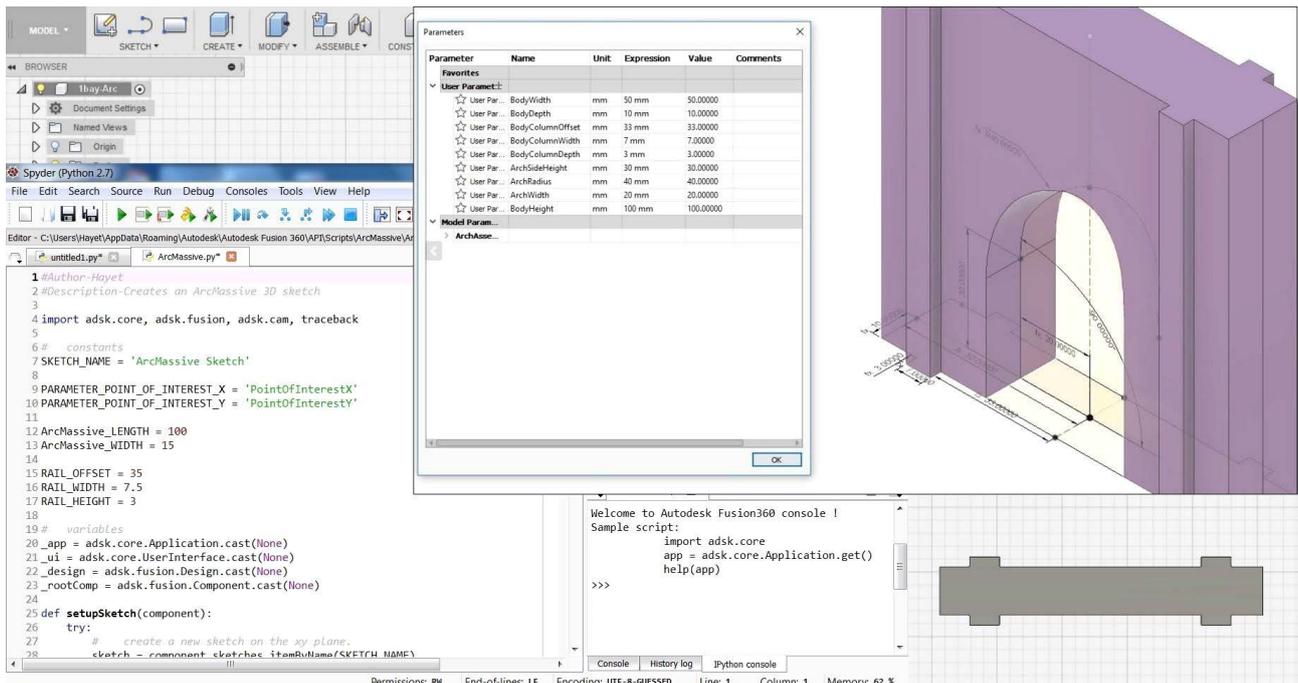


Figure 7. Exemple de code Python 2.7 pour créer un arc de triomphe paramétrable à 1 baie .

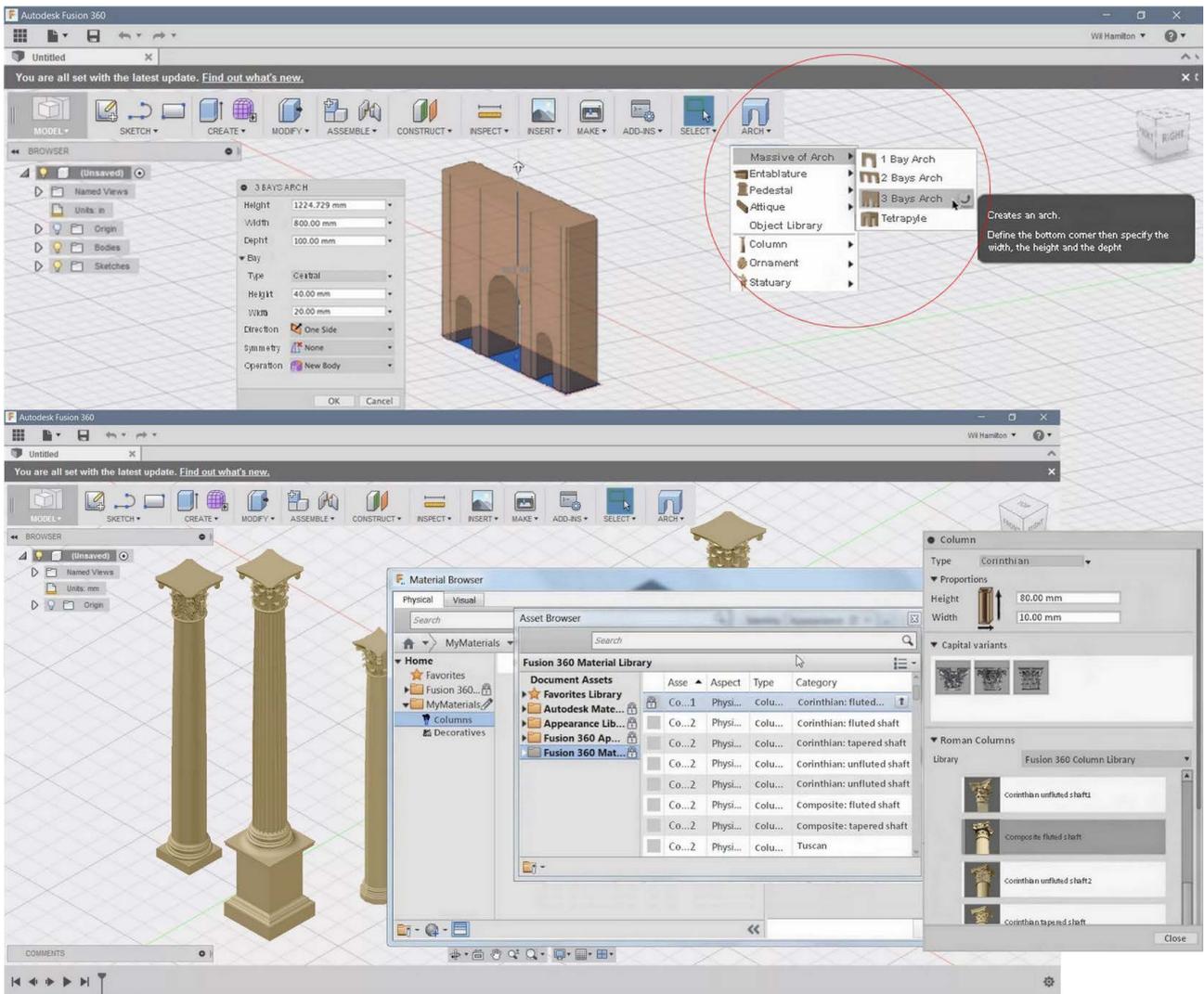


Figure 8. Environnement graphique de Fusion 360 et outils proposés.

Puisque notre travail s'étale sur trois phases dont la modélisation numérique des composants paramétriques, le traitement des nuages de points et la construction 3D du modèle final; nous optons donc pour un environnement graphique offrant le maximum de fonctionnalités pour un moindre transfert de données et de fichiers. Actuellement, la plupart des logiciels Autodesk autorisent l'import des formats de données scannées 3D. Fusion 360 est l'un de ces logiciels avec toutes les propriétés dont nous avons besoin. En plus de son interface facile à utiliser, il prend en charge les maillages issus de la numérisation laser (Autodesk / Fusion 360). Il offre un langage de programmation – Python – développé avec une syntaxe claire qui permet la création de nouveaux outils et fonctionnalités.

Le langage de programmation en question sert à traduire les composants géométriquement descriptibles en modèles paramétrables à intégrer comme nouvelles commandes. Ces nouveaux outils sont destinés à modéliser la forme de base de chaque arc ; relative au massif, à l'entablement et aux attiques. Les premiers scripts ainsi créés correspondent aux composants

constants que sont les massifs d'arc, entablements et attiques. Ils permettent de générer toute forme de base d'un arc de triomphe quelque soit sa typologie, à travers la modification des paramètres. Un exemple de massif d'arc à une baie est généré et décrit avec son code Python (version 2.7) (Figure 7).

En quittant le domaine des formes basées sur les primitives géométriques, il est nécessaire de considérer les solutions suggérées par la modélisation classique basée sur les fonctions booléennes. Ceci concerne les composants complexes correspondant aux éléments décoratifs spécifiques qui doivent être intégrés dans une bibliothèque d'objets architecturaux, préalablement définie. Compte tenu de leurs formes complexes difficilement décrites par une géométrie, les éléments architecturaux classiques (colonnes, bas-reliefs, quadriges...) sont modélisés individuellement et intégrés par des codes en « add-in » sous forme d'objets bibliothèques au niveau de l'interface (Figure 8).

Notre principale fonction recherchée étant le paramétrage permettant modéliser sans redondance et de

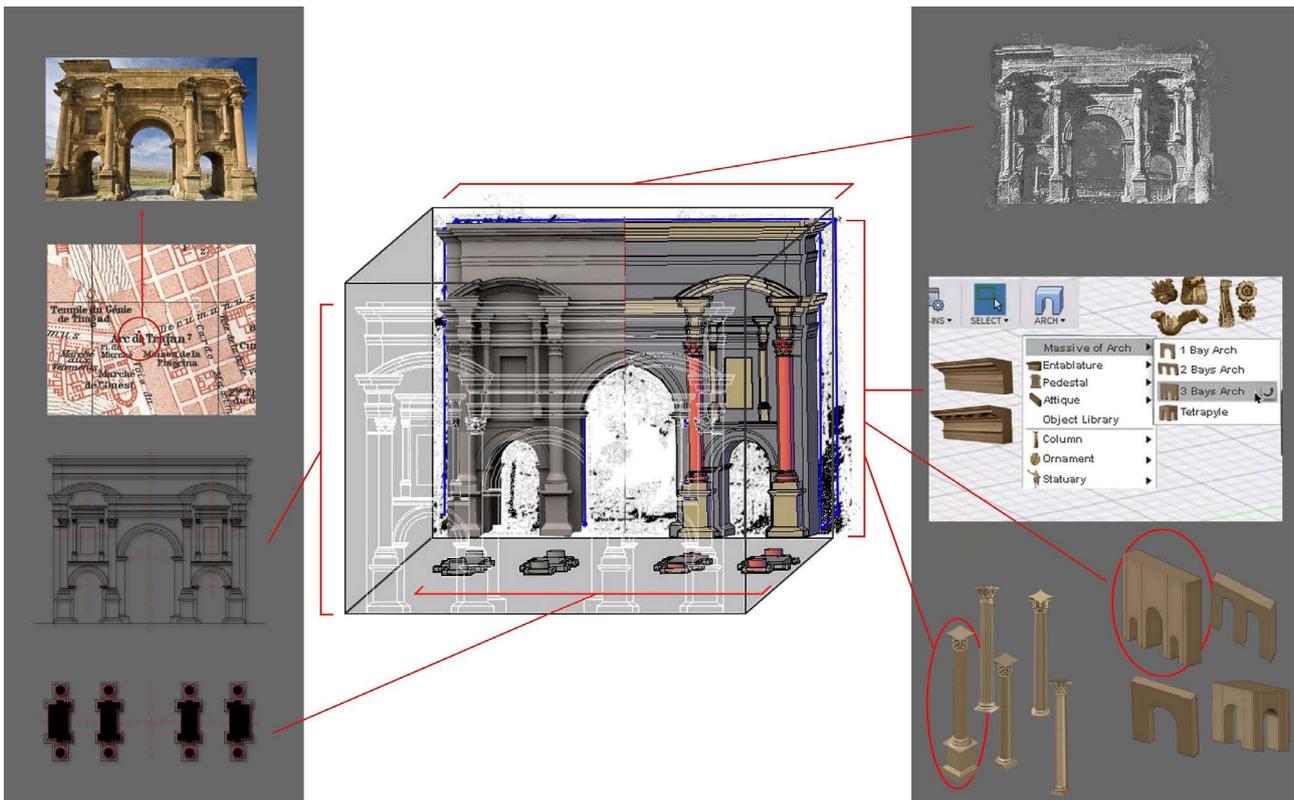


Figure 9. Processus de modélisation 3D paramétrique de l'Arc.

sculpter même des formes organiques, ce premier outil de CAO 3D, FAO et CAE permet de connecter l'ensemble du processus de développement de projet dans une seule plate-forme Cloud. Cette caractéristique rejoint notre objectif futur lié à notre intégration dans le processus BIM, pour une collaboration en ligne avec d'autres concepteurs sur le même modèle.

Construction du modèle 3D

L'aspect de cette phase réside dans l'intégration d'algorithmes développés – correspondant aux objets paramétriques dans le logiciel professionnel de modélisation Fusion 360, et l'ajustage de ces derniers aux nuages de points.

En effet, tout comme l'usage de la photogrammétrie pour la restitution 2D, le relevé laser qui fait l'objet de notre problématique liée à la difficulté de reconnaissance de forme, et à l'exploitation non effective des données laser 3D, va servir non seulement une mesure plus exacte et donc des points 3D réels, mais permettre surtout le paramétrage et l'ajustage précis de nos objets créés (Figure 9).

Etant donné l'aspect expérimental onéreux quant à l'acquisition d'un scanner laser, et en vue de valider nos outils proposés, quelques arcs ont fut l'objet de relevé. Les nuages de points (données brutes) obtenus par GLS-1500 de Topcon, sont automatiquement traités dans ScanMaster afférent au capteur à travers les opérations de consolidation et de segmentation. Le nuage logique est

ensuite exporté vers notre environnement de modélisation paramétrique, en l'occurrence Fusion 360, qui supporte également les maillages et permet une fluidité dans le transfert de modules graphiques à travers des formats normalisés. Sur ce même environnement est effectuée l'opération de construction du modèle final. Il s'agit de faire appel à tous les objets (scripts) paramétrables prédéveloppés et leur ajustage sur le nuage 3D segmenté, en insérant aussi les objets de la bibliothèque relatifs aux éléments de décor. Le modèle 3D résultant semble assez pertinent de par sa construction sur des mesures réelles acquises par la technique de lasergrammétrie étant la plus précise à nos jours. Il constitue le modèle fidèle de l'objet réel, puisque sa construction est basée sur les caractéristiques même de ce dernier traduites géométriquement avec leurs paramètres. La multitude d'objets créés selon les typologies existantes permettrait la modélisation de tout arc de triomphe sans avoir à recourir à des études au cas-par-cas (Figure 10).

Conclusion

La finalité de la recherche loin d'une simple formulation de modèle 3D, consiste à travers l'exploitation de la connaissance architecturale, à faciliter le passage de l'étape d'acquisition et de la description sémantique à une modélisation géométrique. Ceci correspond à une représentation numérique de l'information tridimensionnelle complète. Ces données 3D s'adaptent

aux éléments identifiés aussi par la mesure laser qui a fait l'objet de diverses limites, et où la notion de notre paramétrage tient lieu de principe de cette interprétation. Cet interface graphique agrémenté par un ensemble de nouveaux « add-ins » et dont le code Python permet de paramétrer selon nos besoins, pourrait servir comme environnement de restitution 3D d'objets patrimoniaux et ainsi répondre au besoin croissant de modèles tel-que-construits en vue de simulation d'éclairage de bâtiments, de modèles archéologiques en fin de diverses études, et de nouvelles configurations à partir d'éléments architecturaux existants. L'objectif semble atteint en mettant en place ce processus de reconstitution 3D, basé sur des connaissances préalables et sur la modélisation paramétrique, pour résoudre le problème d'interprétation et de structuration des nuages de points.

L'aspect critique de ce travail reste, pour le long terme, la quantité d'objets à créer et leur utilisation dans des logiciels à licence limitée. Ainsi, la continuité de nos recherches consiste, dans un premier temps, à développer davantage d'outils de modélisation supplémentaires et appropriés à mettre en œuvre dans le logiciel Fusion 360, et leur validation par des expérimentations concrètes.

Toutefois, ceci n'empêche guère de penser à concevoir notre propre interface graphique qui serait entièrement destinée à la reconstitution et analyse patrimoniales. Au-delà de notre cas de modélisation correspondant à l'arc triomphal qui ne fut qu'un exemple pour expliciter notre démarche; le processus et l'outil proposés se veulent généralisables et peuvent s'étendre à une large typologie d'objets. Il inclurait autant de composants architecturaux et archéologiques dont le paramétrage offrirait toutes les instances et configurations possibles. L'automatisation de cette approche de reconstitution 3D sied dans la mise en place de formes en amont et issues de la connaissance de l'objet, à paramétrer librement pour faciliter la structuration et la modélisation géométrique sur des

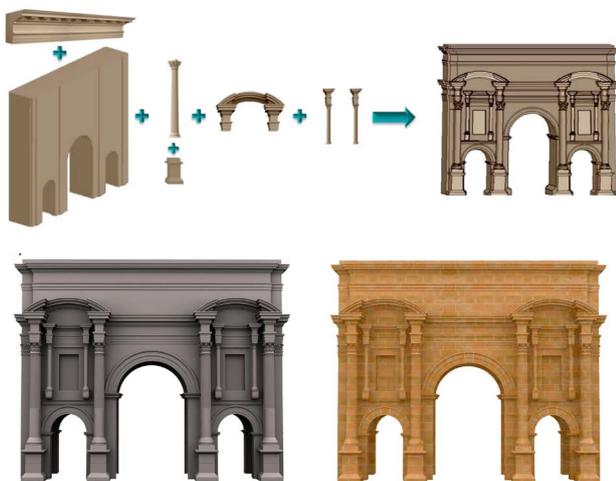


Figure 10. Exemple de modélisation 3D de l'Arc de Triomphe de Timgad: a) processus de reconstruction selon les composants de l'objet; b) modèle 3D résultant et texturé.

nuages de points. Ainsi, est assurée une modélisation plus pertinente et un temps plus réduit.

Bien que les méthodes de modélisation en trois dimensions soient largement utilisées dans la communication du patrimoine historique et la recherche de nouvelles configurations, pour assurer la rigueur du travail du point de vue intellectuel et technique, il est nécessaire d'établir des normes qui répondent aux propriétés de la représentation 3D.

Remerciements

Le projet lié à l'architecture Khmère fut élaboré au CRAI de Nancy après l'acquisition laser réalisée grâce au soutien du conservateur du Musée Guimet (France). L'inventaire a été enrichi par les données recueillies auprès du «Centro studi architettura civilita tradizione del classico» de Università Iuav di Venezia.

References

- 1 El-Hakim, S.; Beraldin J. A., 'Sensor integration and visualization', in *Applications of 3D Measurement from Images*, ed. F. & M. Chandler, Whittles Publishing, Scotland (2007) 259-298.
- 2 Müller, P.; Zeng, G.; Wonka, P.; van Gool, L., 'Image-based procedural modeling of facades', *ACM Transactions on Graphics* **26** (3) (2007) 85, <https://doi.org/10.1145/1276377.1276484>.
- 3 Remondino, F., 'From point cloud to surface: the modelling and visualisation problem', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **34**(5/W10) (2003), <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004655782>.
- 4 Boulaassal, H.; Chevrier, C.; Landes, T., 'From laser data to parametric models: towards an automatic method for building façade modelling', in *Digital Heritage*, ed. M. Ioannides, D. Fellner, A. Georgopoulos & D. G. Hadjimitsis, Springer, Berlin (2010) 42-55, https://doi.org/10.1007/978-3-642-16873-4_4.
- 5 Hassoun, K., 'La représentation de colonne égyptienne papyriforme', dissertation, Université de Montréal, Montréal (1999).
- 6 Charbonneau, N., 'Le recours à des environnements numériques pour la diffusion de connaissances relatives au patrimoine bâti: une exploration du potentiel de la modélisation de systèmes typologiques', dissertation, Université de Montréal Montréal (2009).
- 7 Denis, F., 'Tool for augmented parametric building information modelling for transformable buildings', dissertation, Université Libre de Bruxelles & Vrije Universiteit Brussel, Brussels (2014).
- 8 Boeykens, S., 'Bridging building information modeling and parametric design', in *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2012*, ed. G. Gudnason, R. Scherer, CRC Press, Boca Raton (2012) 453-460, <https://doi.org/10.1201/b12516-71>.
- 9 Dore, C.; Murphy, M., 'Semi-automatic modelling of building façades with shape grammars using historic building information modelling', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **40**(5/W1) (2013) 57-64, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-57-2013>.
- 10 Beinat, A.; Crosilla, F.; Visintini, D.; Sepic, F., 'Automatic non parametric procedures for terrestrial laser point clouds processing', *International Archives of the Photogrammetry,*

Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36**(3/W49B) (2007).

- 11 Lari, Z., Habib, A., 'An adaptive approach for the segmentation and extraction of planar and linear/cylindrical features from laser scanning data', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **93** (2014) 19-212, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.12.001>.
- 12 Gsell, S., *Les Monuments Antiques de l'Algérie. Service des monuments historiques de l'Algérie*, vol. 1, Paris (1901).
- 13 Delamare, Ad. H. A., *Exploration Scientifique de l'Algérie Pendant les Années 1840, 1841, 1842, 1843, 1844 et 1845*. Archéologie, Imprimerie Nationale, Paris (1850).
- 14 Ravosié, A., *Exploration Scientifique de l'Algérie Pendant les Années 1840, 1841, 1842: Architecture et Sculpture*, vol. 1, Paris (1846).
- 15 Frothingham, A. L., Jr., 'A revised list of Roman memorial and triumphal arches', *American Journal of Archaeology* **8**(1) (1904) 1-34, <http://www.jstor.org/stable/497017>.
- 16 Paronuzzi, M.; Zanchetta, L., 'Repertorio degli archi onorari e trionfali romani (I sec. a.C.-IV sec. d.C.)', *La Rivista di Engramma* **66** (2008), http://www.egramma.it/eOS2/index.php?id_articolo=1705.

Reçu: 2017-10-29

Révisé: 2018-1-29

Accepté: 2018-3-28

En ligne: 2018-4-18



Mise à disposition sous licence Attribution-Pas d'Utilisation
Commerciale-Pas de Modification 4.0 International.
Pour voir une copie de cette licence, visitez
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>.