

Modélisations sémantique et géométrique de structures maçonnées

Kévin Jacquot, Livio de Luca

*École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy,
Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie,
UMR MAP n°3495, CNRS
jacquot@crai.archi.fr*

RÉSUMÉ. Dans le domaine du patrimoine architectural, le traitement des données métriques obtenues lors de relevés tridimensionnels est indispensable pour la réalisation de simulations, l'aide au diagnostic et pour la restauration. Notre objectif est d'obtenir, à partir de ces données, un modèle 3D et sémantique destiné à l'étude mécanique des structures en pierre. Une méthode basée sur les connaissances architecturales est ainsi développée pour permettre une rétro-conception des structures maçonnées. Les connaissances théoriques sur le domaine sont tout d'abord modélisées pour permettre d'identifier et d'expliquer les contraintes topologiques et les éléments géométriques qu'elles gouvernent. Les modèles paramétriques et les algorithmes d'ajustements implémentés et créés à partir de l'ontologie précédente permettent la reconstruction géométrique et la structuration sémantique des structures maçonnées présentes dans les données brutes relevées.

MOTS-CLÉS : Relevé 3D, Rétro-conception, 3D sémantique, Maçonnerie.

ABSTRACT. In the architectural heritage field, the control over spatial data is the indispensable prerequisite for the representation, analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. Our aim is to move from 3D survey raw data to semantic 3D models dedicated to mechanic behavior analysis. A knowledge-based method is developed for the reverse engineering of masoned structures. Semantic and topological constraints are identified and explicated through the creation of a knowledge model of masonry works. This knowledge is used to implement a parametric models and extraction features programs that allow us to reconstruct and semantically structured the raw data.

KEYWORDS: 3D survey, Reverse engineering, 3D Semantic, Masonry.

Titre ouvrage

1. Introduction

Le projet Monumentum a pour objectif de concevoir une plateforme logicielle ouverte et extensible pour la capitalisation et la gestion de connaissances favorisant la compréhension et l'analyse des phénomènes de dégradation qui affectent les édifices en maçonnerie de pierre naturelle. L'utilisation et la visualisation des données 3D ont changé la perception de l'information, la façon d'accéder et d'échanger des connaissances, ainsi que les méthodes d'interprétation et d'analyse des données du patrimoine construit. Diverses approches propres au domaine de l'architecture ont été développées pour acquérir des modèles 3D précis, pour structurer l'information et faciliter la manipulation des données et leur interprétation en fonction des objectifs d'analyse.

La maîtrise des données spatiales est le préliminaire indispensable à toutes actions d'analyse et de diagnostic pour la conservation de l'ouvrage. En ce qui concerne la morphologie des ouvrages, il est alors nécessaire de passer des données brutes du relevé (le nuage de point) à un modèle 3D « intelligible » au travers de la définition des aspects sémantiques caractérisant l'ouvrage, des relations topologiques et paramétriques entre ses éléments, et de leur géométrie.

Cet article présente les premières expérimentations menées pour obtenir des modèles géométriques structurés sémantiquement adaptés aux besoins de Monumentum. À la suite de cette introduction, un chapitre établit un état de l'art en matière de reconstruction géométrique et sémantique de nuage de point dans le domaine architectural. Le troisième chapitre présente la méthode générale tandis que le chapitre quatre est consacré à la modélisation des connaissances. Les premières expérimentations et résultats sont développés dans le chapitre cinq.

2. État de l'art

Plusieurs approches sont possibles pour modéliser la géométrie et structurer sémantiquement les données obtenues par relevés 3D. Le niveau de détail attendu, la complexité géométrique de l'objet ou la qualité des données brutes sont quelques-uns des points à considérer pour choisir ce qui est souvent nommé de manière abusive des processus *Scan-to-BIM* (Volk et al., 2014). Dans la plupart des cas, l'objectif des projets recourant à ce type d'opérations n'est pas la création d'un système

Titre article

d'information architecturale, mais plutôt la modélisation paramétrique, et plus rarement, la structuration sémantique de bâtiments existants (Dore, Murphy, 2013).

Aujourd'hui, plusieurs solutions sont proposées par des éditeurs de logiciels : CloudWork de Leica, Scan to BIM d'Imaginit ou VirtuSurv de Kubi. De nouvelles fonctionnalités ont également été introduites dans des logiciels d'architecture pour permettre l'affichage et la manipulation de nuages de point. Plusieurs projets s'appuient en particulier sur Revit d'Autodesk (Quattrini et al., 2015 ; Garagnani, Manferdini, 2013 ; Breggianni, 2013 ; Autodesk Labs, 2012). TC Labs, dans le cadre du projet GreenSpider, a développé un plug-in pour Revit permettant la conversion de nuages de point en données adaptées aux outils natifs du logiciel. Cependant, le nuage de point est obligatoirement segmenté de manière à ce que chaque sous-ensemble du nuage ne contiennent qu'un seul objet à reconstruire. En 2012, Autodesk Labs a présenté *Point Cloud Feature Extraction* pour Revit. Il s'agissait d'un nouvel outil intégré au logiciel permettant de détecter dans le nuage de point des sous-ensembles correspondants aux sols, aux murs, etc. et d'y ajuster automatiquement un modèle paramétrique issus des bibliothèques de Revit.

La modélisation paramétrique est au centre des approches de reconstruction géométrique et sémantique. Des langages textuels de programmation sont utilisés depuis plusieurs années pour la reconstruction d'architectures existantes. Cependant, la maîtrise de ces langages requière une période d'apprentissage importante ou l'intervention de tiers dans le projet. Depuis 2007 et l'apparition de nouveaux logiciels comme Grasshopper, l'algorithme peut être implémenté en utilisant un langage visuel de programmation. Cela dispense le chercheur de compétences poussées en programmation tout en lui permettant de réduire le va-et-vient entre la géométrie et le programme qui l'a générée et lui conférant par la même occasion plus de temps pour développer des algorithmes efficaces (Maleki, Woodbury, 2010). Plusieurs expérimentations ont déjà été réalisées avec Grasshopper dans le but d'extraire des éléments architecturaux caractéristiques proches des tracés régulateurs utilisés pour contrôler les proportions et la position d'éléments architecturaux (Ching, 2012). Parmi les projets les plus notables, nous pouvons citer l'extraction des tracés géométriques régulant la construction des fortifications bastionnées (Jacquot et al., 2016), des tracés des ordres classiques (Chevrier et al., 2009 ; De Luca et al., 2006) ou des tracés de baies gothiques (Havemann, 2005 ; Takayama, 2013).

Titre ouvrage

3. Méthode de reconstruction

Nous avons développé une méthode permettant d'améliorer les données géométriques obtenues au terme de l'acquisition 3D. Fondée sur l'utilisation de modèles, notre approche utilise la connaissance architecturale et les contraintes topologiques existantes entre les éléments architecturaux pour permettre la génération d'instances de modèles architecturaux paramétriques ajustée aux données relevées.

Notre méthode de rétro-conception s'appuie ainsi sur le contenu théorique contenus dans des livres de références, comme les traités de stéréotomie et les dictionnaires d'architecture. L'ensemble de ces connaissances est modélisé sous la forme d'une ontologie de domaine afin d'identifier les différentes entités et d'explicitier les relations géométriques que ces dernières entretiennent. Près de 200 modèles de structures maçonnées ont été ainsi étudiés, mais l'analyse s'est avant tout concentrée sur les règles de construction des principaux types d'arcs et de voûtes (Figure 1, A). L'extraction du tracé géométrique régulant le dessin des arcs et des voûtes (Figure 1, B) requièrent d'une part, l'implémentation de modèles paramétriques et d'autre part, la création de programmes d'extraction. Les éléments géométriques caractéristiques d'arc et de voûtes reconstruits peuvent ensuite être utilisés dans des opérations de modélisation et de structuration sémantique tirant profit des outils présents dans des logiciels existants (Figure 1, C). Grâce aux bibliothèques paramétriques natives de ces logiciels et à leurs capacités à éditer des géométries importées, les géométries extraites lors de la précédente opération (des intrados) peuvent être traitées pour modéliser des objets architecturaux structurés sémantiquement (des voûtes ou des arcs).

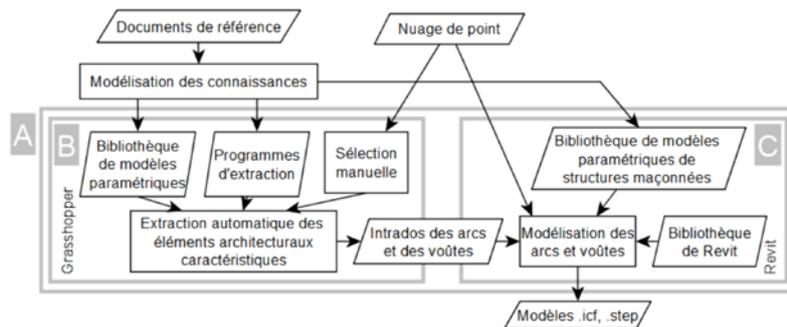


Figure 1. Principales étapes de la méthode de reconstruction géométrique des arcs et voûtes à partir des données brutes de l'acquisition.

4. Modélisation des connaissances des structures maçonnées

Le processus de reconstruction s'appuie sur une ontologie de domaine qui a été élaborée à partir de dictionnaires (Pérouse de Montclos et al., 2011 ; Chatenet, Verdier, 2000), ainsi que de traités de stéréotomie (Rondelet, 1830). Ils fournissent les ressources essentielles à la modélisation du vocabulaire : l'ensemble des termes décrivant les concepts du domaine ; et la grammaire : l'ensemble des règles de construction déterminant les contraintes géométriques entre les concepts.

D'une part, les arcs sont construits à partir de courbes géométriques (coniques, lignes polygonales, chaînettes, etc.). D'autre part, les voûtes, et en particulier leurs intrados, sont le fruit d'une opération géométrique consistant au balayage d'une courbe génératrice le long d'une courbe directrice (Bertoline et al., 2010). N'importe quel arc peut être utilisé comme génératrice pour la modélisation de voûtes en berceau, d'arêtes, d'ogives ou de coupoles.

Ainsi, pour créer une voûte en berceau, une génératrice est balayée le long d'une courbe ou d'une portion de courbe pouvant être un segment, une ellipse, une ligne polygonale, une hélice, etc. La coupole peut être modélisée par le balayage d'une partie d'une génératrice le long d'un cercle ou d'un polygone (Figure 2, b). Les voûtes d'arêtes et d'ogives sont le produits du balayage d'une génératrice le long de chaque apothème d'un polygone (Figure 2, c). Les limites de chacune des surfaces obtenues forment les arêtes (pour les voûtes d'arêtes) ou les nervures (pour les voûtes d'ogives). D'autres voûtes peuvent également être obtenues sur ce dernier principe comme les voûtes à arêtes doubles (Figure 2, d), triples (Figure 2, e), et celles composées de compartiments supplémentaires.

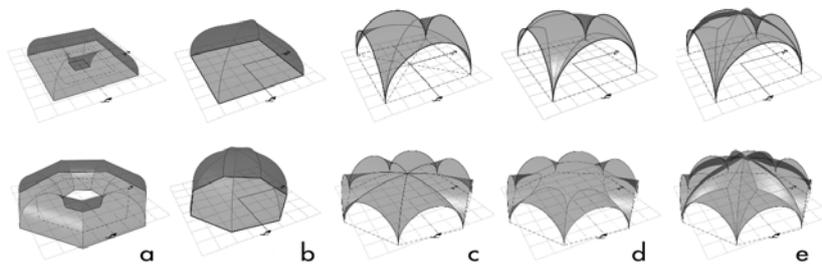


Figure 2. Quelques-unes des voûtes décrites dans l'ontologie de domaine du projet Monumentum : a. voûtes en berceau, b. coupoles, c. voûtes d'arêtes simples, d. voûtes à arêtes doubles, e. voûtes à arêtes triples.

5. Reconstruction des arcs et des voûtes

La reconstruction géométrique et la structuration sémantique des arcs et des voûtes se composent de deux étapes successives : l'extraction des éléments architecturaux caractéristiques et la modélisation des arcs et voûtes.

5.1. Extraction des éléments architecturaux caractéristiques

L'expérimentation est opérée sur un nuage de point représentant une des voûtes d'arêtes composant la nef de la cathédrale de Nancy. Comme nous l'avons énoncé précédemment, ce type de voûte est le fruit du balayage d'une génératrice le long de chaque apothème d'un polygone.

La première étape de l'extraction est la détermination des paramètres dimensionnels et de leurs valeurs. L'opération consiste en l'analyse du nuage de point en vue d'extraire les valeurs des paramètres de créations communs à toutes les génératrices (plan de naissance, portée et flèche). Une fois le nuage de l'intrados de la voûte importé dans Grasshopper, plusieurs opérations automatiques vont se succéder. Un volume englobant minimum est généré pour fournir une approximation des différents plans et axes de création de la voûte. Les données aberrantes présentent dans le nuage de point (erreur de consolidation, données manquantes, etc.) doivent encore être ignorées. Ensuite, des lots de points appartenant à une série de boîtes englobantes réparties régulièrement le long de l'axe vertical sont sélectionnés. Avec les courbes directrices approximatives obtenues à partir du volume englobant, ces lots de points sont groupés en fonction des deux directrices de la voûte (Figure 3, a). Il est possible de déterminer le centre d'arcs de cercle ajustés aux différents lots de points (Figure 3, b). De ces centres et arcs de cercles peuvent être déduites les différentes flèches et portées des arcs générateurs (Figure 3, c).

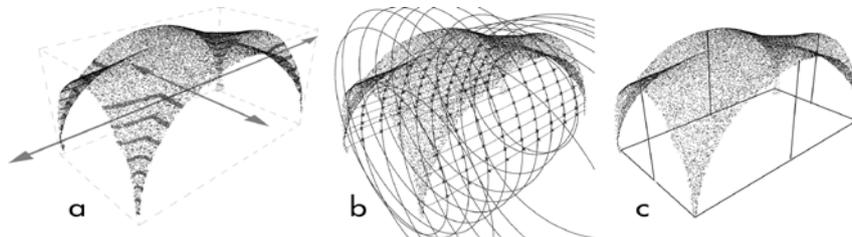


Figure 3. Principales étapes du processus permettant de déterminer les paramètres dimensionnels et leurs valeurs.

Titre article

La seconde étape de l'extraction est la détermination de la typologie de la voûte. À partir de l'ontologie, une bibliothèque de modèles architecturaux paramétriques a été implémentée dans Grasshopper. Une bibliothèque d'une vingtaine de courbes génératrices a ainsi été créée. Trois paramètres contrôlent les propriétés dimensionnelles de ces courbes : le plan de naissance, la portée (la largeur), et pour certaines courbes : la hauteur (la flèche). Complétée par l'implémentation des modèles de courbes directrices, la bibliothèque permet de modéliser plusieurs centaines de voûtes différentes par la variation des paramètres dimensionnels mais également typologiques (types de génératrices et de directrices). Les trois valeurs des paramètres permettant la génération de n'importe quel arc implémenté dans la bibliothèque de modèles paramétriques ont été extraits du nuage de point de la voûte lors de la première étape. Chacun de ces modèles théoriques d'arc est instancié selon les valeurs obtenues lors de l'analyse précédemment menée (Figure 4, a). Pour chaque arc ainsi modélisé, la distance moyenne entre la géométrie paramétrique et le nuage de point est calculée. Il est ainsi possible de déterminer le type d'arc présent dans les données relevées, ainsi que d'identifier ses caractéristiques dimensionnelles : portée et flèche. La voûte est finalement modélisée par le balayage de l'arc instancié le long des génératrices identifiées lors de l'opération d'extraction des paramètres générateurs des arcs (Figure 4, b).

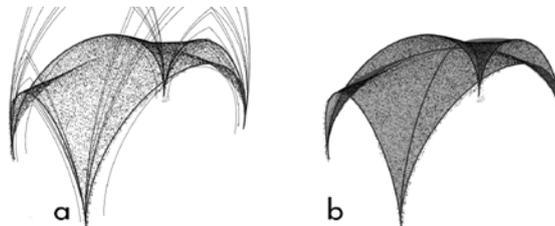


Figure 4. Principales étapes du processus permettant de déterminer la typologie de la voûte et la reconstruction des surfaces formant les intrados.

5.2. Évaluation de la précision des intrados reconstruits

Une quinzaine d'intrados ont été reconstruits à partir de l'analyse de trois jeux de nuages de point. Outre les voûtes d'arêtes de la cathédrale de Nancy, plusieurs voûtes en berceau de l'église de Caromb ont fait l'objet de notre expérimentation. L'évaluation de la précision des recons-

Titre ouvrage

tructions est réalisée sur le logiciel Geomagic en utilisant le nuage de point initial comme référence. La distance moyenne pour les intrados de Caromb est inférieure au centimètre. Les résultats pour les voûtes d'arêtes de Nancy sont proches : la distance moyenne est d'environ 12cm, alors que l'écart type reste faible (moins de 10cm) par rapport à celui de Caromb (12cm).

Il est à noter également que les données brutes de l'acquisition n'ont pas été obtenues avec les mêmes techniques. Des capteurs laser ont été utilisés pour le relevé de l'église tandis que de la photogrammétrie a été utilisée pour la cathédrale. Les nuages de points ont donc des propriétés différentes qu'il s'agisse de résolution, de bruit, de données manquante.

5.3. Modélisation des arcs et voûtes.

Dans l'opération précédente, des surfaces représentant les intrados de voûtes ont été obtenus à partir des données brutes du relevé et d'une ontologie spécifique aux structures maçonnées. Pour avoir des modèles enrichis sémantiquement, nous expérimentons maintenant une approche mettant à profit les outils présents dans le logiciel Revit. Une méthode a été définie pour la création de voûtes en berceau à partir des intrados extraits du nuage de point. Les surfaces sont transférées dans le logiciel Rhino pour pouvoir être exportée dans un format d'échange permettant l'édition des données dans Revit. L'outil *Importer CAO* permet d'ouvrir les intrados en tant qu'*Élément in situ* et ainsi de profiter d'outils capable de créer des modèles sémantiques non prédéfinis dans le logiciel. Enfin, l'opération *Toit par face* permet de créer une voûte, ou en l'occurrence un toit, qui est paramétrable au même titre que les autres modèles paramétriques du logiciel. Les objets reconstruits sont ainsi compatibles avec le modèle de données IFC et le système d'information BIM. Les premiers tests effectués sur les voûtes d'arêtes de la cathédrale de Nancy ont quant à eux échoué du fait de l'impossibilité de Revit d'effectuer l'opération de modélisation en présence d'arêtes. La solution adoptée jusqu'à présent a été de décomposer les intrados pour appliquer l'opération de modélisation pour chacune de ces surfaces successivement.

6. Conclusion

Face à la difficulté de collecter, comparer et analyser les données préalables à la restauration, le projet Monumentum mobilise diverses disci-

Titre article

plines afin de définir un prototype de chaîne de traitement de l'information incluant notamment l'enrichissement des données récoltées lors de campagne d'acquisition 3D. Pour répondre à cet enjeu, cet article présente une méthode de reconstruction géométrique et de structuration sémantique qui permet de combler les insuffisances des données brutes du relevé par l'utilisation de modèles paramétriques. Les premiers résultats sont encourageants et le développement de notre approche doit se poursuivre sur d'autres cas d'études pour, en particulier, améliorer les algorithmes de reconstruction en présence de bruit, augmenter le nombre de structures maçonnées à même d'être reconstruites par notre outil et enfin améliorer l'enrichissement sémantique.

7. Bibliographie

Autodesk Labs (2012). *Autodesk Labs: Point Cloud Feature Extraction for Autodesk Revit* [en ligne].

Bertoline, G. R., Wiebe, E., Hartman, N. & Ross, W. (2010). *Fundamentals of graphics communication*. New York : McGraw-Hill Higher Education.

Bregianni, A. (2013). *BIM Development for Cultural Heritage Management*. Diploma Thesis. Athènes, Grèce. National Technical University of Athens School of Rural & Surveying Engineering Lab of Photogrammetry et Politecnico di Milano School of Architecture B.E.S.T Department.

Cartwright, T. A., Vergès-Belmin, V. & International Scientific Committee For Stone. (2008). Illustrated glossary on stone deterioration - Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre. *Monuments and Sites, 15*. Paris : ICOMOS.

Chatenet, M. & Verdier, H. (2000). Thesaurus de l'architecture. *Documents & méthodes, 7*. Paris : Patrimoine : Sous-direction des études, de la documentation et de l'inventaire, Direction de l'architecture et du patrimoine, Ministère de la culture et de la communication.

Chevrier, C., Charbonneau, N., Grussenmeyer, P. & Perrin, J.-P. (2009). Elaboration de nouvelles configurations à partir de cas existants du patrimoine bâti Conception architecturale paramétrique. In *SCAN*. Nancy. 2009.

Ching, F.D.K. (2012). *Architecture: Form, Space, and Order*. New Jersey : John Wiley & Sons.

Titre ouvrage

De Luca, L., Veron, P. & Florenzano, M. (2006). Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach. *Computers & Graphics*, Vol. 30, n° 2, p. 160-176.

Dore, C. & Murphy, M. (2013). Semi-Automatic Modelling of Building Facade with Shape Grammars Using Historic Building Information Modelling. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XL-5/W1, 57-64.

Garagnani, S. & Manferdini, A. M. (2013). Parametric Accuracy: Building Information Modeling Process Applied to the Cultural Heritage Preservation. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W1, 87-92.

Havemann, S. (2005). *Generative Mesh Modeling*. PhD thesis. Germany : Braunschweig Technical University.

Jacquot, K., Chevrier, C. & Halin, G. (à paraître). Knowledge based Approach: from Scale Model To 3D Replica. In *Journal on Computing and Cultural Heritage*.

Maleki, M. M. & Woodbury, R. F. (2010). Programming in the model: contextualizing computer programming in CAD models. In *Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference*. 35-41.

Pérouse De Montclos, J.-M. (2011). *Architecture : description et vocabulaire méthodiques*. Paris : Éd. du Patrimoine, Centre des monuments nationaux.

Quattrini, R., Malinverni, E. S., Clini, P., Nespeca, R. & Orlietti, E. (2015). From TLS to HBIM. High Quality Semantically-Aware 3D Modeling of Complex Architecture. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XL-5/W4, 367-374.

Rondelet, J. (1830). *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir. Tome 2*. Paris : A. Rondelet fils.

Takayama, J. (2013). Computer-generated Gothic Tracery with a Motif-oriented Approach. In *Proceedings of IASDR 2013*.

Volk, R., Stengel, J. & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. In *Automation in Construction*, 38, p. 109-127.