

Une Ontologie pour la Modélisation des Fortifications Bastionnées

K. Jacquot, C. Chevrier et G. Halin

*MAP-CRAI, Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie,
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
e mail : (jacquot, chevrier, halin)@crai.archi.fr*

RESUME. Le projet de numérisation 3D des plans-reliefs est né d'une volonté de conservation et de valorisation d'un patrimoine qui, bien que classé Monument Historique, reste mal connu. De par les caractéristiques des plans-reliefs (échelle, surface, état de conservation, densité et répétition des objets présents sur les maquettes,...) les données acquises par les techniques de numérisation tridimensionnelle ne sont pas suffisantes pour une reconstruction 3D. Pour répondre aux enjeux de numérisation, de modélisation et de valorisation, nous développons une ontologie des fortifications bastionnées qui nous permet, dans un premier temps, d'élaborer une bibliothèque d'objets paramétriques pouvant être ajustés sur les sources disponibles (données relevées, plans,...). A terme, la modélisation des concepts de fortification bastionnée doit nous permettre d'automatiser la modélisation et d'enrichir du point de vue de la sémantique constructive le modèle virtuel final.

MOTS CLES : Patrimoine culturel ; maquette ; fortifications bastionnées ; modélisation paramétrique ; ontologie ; rétro-conception.

Introduction

Ces dernières années, la modélisation du patrimoine bâti par le biais d'outils paramétriques a été la réponse récurrente aux imperfections inhérentes des techniques de relevés tridimensionnels. La photogrammétrie et la lasergrammétrie permettent d'obtenir des données de plus en plus précises et de manière automatique mais des problèmes dans les étapes de

reconstruction subsistent. L'un de ces inconvénients est leurs incapacités à pouvoir traiter des projets à la fois de grandes dimensions et riches en détails (Remondino et al., 2009).

La numérisation des plans-reliefs fait partie de ces projets. Cette collection née sous Louis XIV compte aujourd'hui une centaine de maquettes au 1/600 dont la taille (150 m² pour la plus grande) et la forme varient grandement. Le but de ces objets était de représenter les “projets de fortifications, les forteresses d'un territoire, ou encore les travaux de siège dirigés contre une ville”.

Cette première étape du projet (Chevrier et al., 2011) ne porte que sur une partie du plan-relief de Toul (Meurthe et Moselle) : une portion de la table de la ville et une des tables de la campagne (figure 1). C'est une maquette récente (XIX^e siècle) et pourtant son état de conservation est mauvais du fait de l'emploi de matériaux de construction fragiles (soie, papier, sable,...) et de mesure de protection insuffisante contre la poussière et la lumière. L'acquisition par capteur laser est d'autant plus compliquée qu'il est impossible d'accéder à certaines parties de la maquette étant donné ses dimensions et la densité d'objets qu'elle présente.

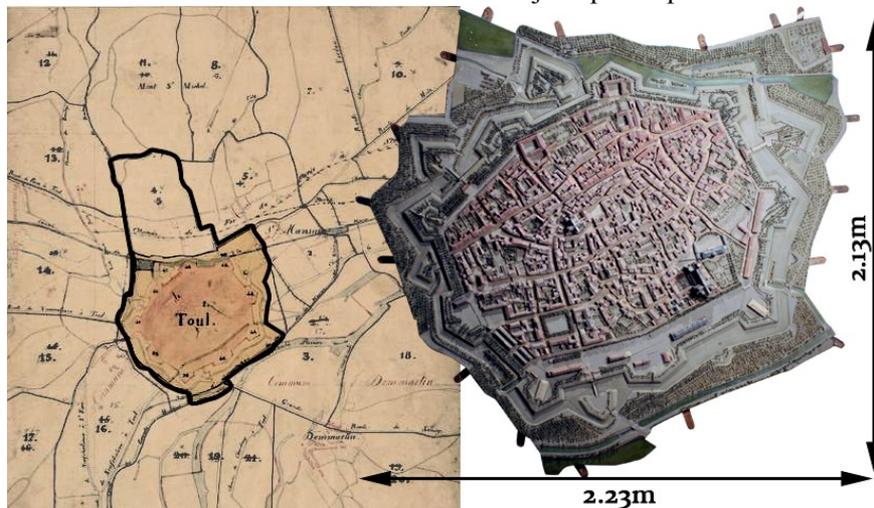


figure 1: Plan des tables et table de la ville du plan-relief de Toul.

La création d'un modèle virtuel de plan-relief – consultable sur internet, tablette ou borne – permet de préserver un témoignage de l'urbanisme et de l'architecture de l'évolution du paysage français. C'est aussi un support documentaire multimédia – relié à la base Mérimée² p. ex. – qui per-

1. Musées des Plans et Reliefs. 2011. www.museedesplansreliefs.culture.fr/

2. Ministère de la Culture et de la Communication. Base Mérimée. 2011.

met la diffusion et la valorisation d'un patrimoine fragile devant être restauré et rarement exposé par manque de moyen. En effet, seulement 26 plans-reliefs sont exposés aux Invalides, qui plus est derrière des vitrines climatisées³.

A la suite de cette introduction, nous présentons un état de l'art traitant de l'utilisation faite des connaissances architecturales – notamment à travers l'emploi de bibliothèques d'objets paramétriques – pour améliorer la modélisation d'objets issus du patrimoine. La méthode est ensuite présentée et détaillée dans les parties traitant de l'étude des fortifications bastionnées et de la modélisation des concepts de cette discipline, à la suite de quoi sont exposées les premières expérimentations. La dernière partie nous permet de conclure et d'avancer de futurs développements.

L'acquisition et la modélisation du patrimoine bâti.

L'étape de numérisation du patrimoine s'appuie essentiellement sur deux techniques – la photogrammétrie et la lasergrammétrie – qui permettent de récolter des données sous forme de nuages de points qui ne renseignent que la position spatiale d'un ensemble de points (Remondino et al., 2010). En effet, l'objet obtenu n'est qu'un maillage indifférencié de milliers de facettes dont la géométrie n'est jamais totalement fidèle ou complète. La création de composants à partir de cette géométrie est encore limitée à la reconnaissance automatique de formes simples (plans, cylindre,..). En photogrammétrie, il est possible de modéliser manuellement et directement sur des clichés orientés ce qui permet la création d'objets géométriques plus complexes. Malgré cela, ces données brutes ne sont jamais suffisantes, ni pour reconstruire le volume représenté par l'objet, ni pour répondre aux demandes d'enrichissement sémantiques pour la muséographie et l'archivage. (Cruz et al., 2008 ; Schinko et al., 2010).

Pour la création de bibliothèque d'objets paramétrés, de nombreux projets formalisent les connaissances architecturales explicites (traités d'architecture) mais aussi implicites (une porte appartient à une paroi de type mur). Basés sur les règles architecturales de composition mais également sur d'autres sources de données telles que des plans, des photographies et des relevés laser, les plate-formes GOP (Chevrier et al., 2009), Nubes (de Luca et al., 2007) et celles reposant sur le “ GML ” de Havemann (2004) permettent de faciliter la reconstruction 3D virtuelle de mo-

3. www.culture.gouv.fr/culture/inventai/patrimoine/

numents historiques. Les éléments architecturaux (voûte, porte, fenêtre, colonne...) sont d'abord étudiés de manière théorique pour différents styles architecturaux à partir de données bibliographiques, de pratiques de construction et de cas concrets pour venir enrichir une bibliothèque de composants paramétriques. Pour GOP et Nubes, chacun des objets – décrit par un ensemble de paramètres qui permettront sa construction – peut être ajusté manuellement sur des nuages de points en modifiant les valeurs des paramètres et ainsi s'adapter à différentes situations. Projet comparable, le HBIM (Historic Building Information System) de Murphy (2011) est une bibliothèque d'objets architecturaux créés d'après des traités d'architecture, qui vient compléter celles présentes sur les plateformes BIM courantes (Revit, ArchiCad, Bentley,...). Automatisant le processus de rétro-conception, des projets (Cruz et al., 2008; Cantzler et al., 2002) mettent en œuvre des réseaux sémantiques, sorte d'ontologies, pour définir les concepts et les relations liant les différents composants d'un objet. Dans le cas de Cantzler, une segmentation du nuage de points initial en entités géométriques (plans) puis une identification parmi ces plans des composants d'un bâtiment (toit, sol, mur,...) permettant, grâce à leurs configurations géométriques particulières (orthogonalité, parallélisme,...), la reconstruction tridimensionnelle automatique du modèle.

Enfin, en ce qui concerne la simulation de ville (Rome antique, planification urbaine,...), CityEngine⁴, système de génération de géométries utilisant une grammaire de formes “ CGA shape ”, permet de créer des environnements tridimensionnels réalistes selon des règles prédéfinies et des plages de valeurs paramétrées.

Méthode de reconstruction des fortifications

La méthode que nous mettons en œuvre dans ce projet a pour objectif la reconstruction paramétrique des fortifications bastionnées présentes sur les plans-reliefs. Elle se décompose en deux étapes :

- La première est l'étude des traités de fortifications afin d'en extraire les informations telles que les règles de construction, les paramètres et valeurs nécessaires à la création de composants paramétrés.
- Ces informations sont ensuite modélisées sous la forme d'une ontologie afin d'explicitier les relations entre les géométries, les paramètres et la sémantique de cette discipline. Son contenu va per-

4. Esri. CityEngine. 2011. www.esri.com/software/cityengine/index.html

mettre non seulement l'implémentation des objets sous Grasshopper^s mais également l'enrichissement sémantique du modèle 3D final de plans-reliefs

Étude des traités de fortifications bastionnées.

La conception des fortifications, et plus particulièrement les systèmes de fortifications bastionnées, dépendent de règles de construction géométriques strictes relatives à la puissance et aux avancées techniques de l'armement de l'époque (portée, capacité de pénétration, ricochets,...). Par conséquent, une fortification peut être le résultat du travail s'étalant sur plusieurs siècles. Chacun des objets composant les fortifications est précisément proportionné avec des dimensions et des appellations normalisées.

Ces ouvrages d'architecture militaire, bien que relégués par l'histoire " au rang de création secondaire et mineure " (Orgeix, 2009) sont tout aussi riches que leurs équivalents civils. Ils commencent à être publiés dès le début du XVII^e siècle et déjà : " font de la géométrie l'essentiel des connaissances utiles à un ingénieur " (Virol, 2003) pour l'élaboration de fortifications. Leur contenu est également riche en ce qui concerne les principes, l'histoire, la terminologie et les méthodes de construction des fortifications. Ces traités sont donc une manne dans un projet de création de bibliothèque d'objets paramétriques.

Pourtant, de par les nombreux ingénieurs qui se sont succédés au cours des trois siècles d'évolution des fortifications bastionnées, nombreux sont les traités et théories (Balliet, 2009) " dont le contenu et la hiérarchie restent souples et fluctuants " (Orgeix, 2009). Ainsi, il est nécessaire de limiter le corpus d'ouvrages étudiés aux plus pertinents. La notoriété de Vauban en matière de fortification nous fait naturellement nous intéresser à cet ingénieur en premier. Il a laissé sa marque sur la plupart des sites fortifiés de France et aussi sur les plans-reliefs qui les représentent. Les idées de Vauban ont été rapportées dans des ouvrages plus ou moins fidèles à sa pensée. En effet, " bien que Vauban ait refusé de présenter son art de fortification dans un ouvrage spécifique, ses successeurs ont voulu voir, chez lui, l'emploi de trois systèmes de fortification " (Virol, 2003 : p. 57).

Ayant dégagé un premier corpus de traités sur des critères historiques (les traités fondateurs et les rapporteurs/successeurs de Vauban), leur étude nous permet une meilleure compréhension de la science de la forti-

fication. Les premières analyses de ces traités démontrent l'existence de tracés régulateurs formant l'ossature de la fortification bastionnée. Parmi ces tracés, le premier à prendre en considération est la magistrale car “ c'est elle que représente le principal trait dans les plans, et d'où l'on commence à compter les largeurs de chaque partie de la fortification ” (Le Blond, 1756 : p. 370). Et ces parties sont nombreuses comme le met en évidence la diversité des dispositifs possibles, des contraintes géométriques entre ouvrages (figure 2), des dimensions et des termes utilisés.



figure 2: Le système de fortifications vaste et complexe présent sur le plan-relief de Strasbourg (1725) est le fruit de 500 ans d'agrandissements successifs.

Modélisation des connaissances en fortifications bastionnées

Nommer, structurer et hiérarchiser les termes et concepts d'un domaine permet d'organiser les connaissances de ce domaine pour en dégager un modèle, c'est-à-dire “ une vision abstraite et synthétique du réel pour mieux l'appréhender dans le contexte d'une finalité déterminée⁶ ”. Le vaste corpus de connaissances généré par l'étude des traités de fortification pose alors le problème de l'organisation et de la représentation de ce savoir. L'ontologie de la fortification bastionnée va permettre de satisfaire différents enjeux : partager la compréhension commune de la structure de l'information, permettre la réutilisation du savoir sur un domaine, expliciter ce qui est considéré comme implicite sur un domaine,... Il en ressort que la fortification bastionnée est un ensemble d'ouvrages ou d'obstacles dont la position et les dimensions sont déterminés par des contraintes défensives (portée de l'artillerie, angles morts,...). Chacun de ces ouvrages peut être généralement interprété comme la combinaison

6. Bibliothèque nationale de France. Modélisation et ses applications. 2011. www.bnf.fr/fr/professionnels/modelisation_ontologies.html

d'un tracé polygonal (ou magistrale) et d'un profil de rempart. Ces ouvrages peuvent être ensuite complétés par différents éléments (embrasure, traverse,...). Dans l'ontologie résumé dans la figure 3, la magistrale est la **génératrice** sur laquelle est balayée un **profil** donnant naissance à un **ouvrage** qui peut recevoir des éléments **accessoires** (orillon, traverse,...).

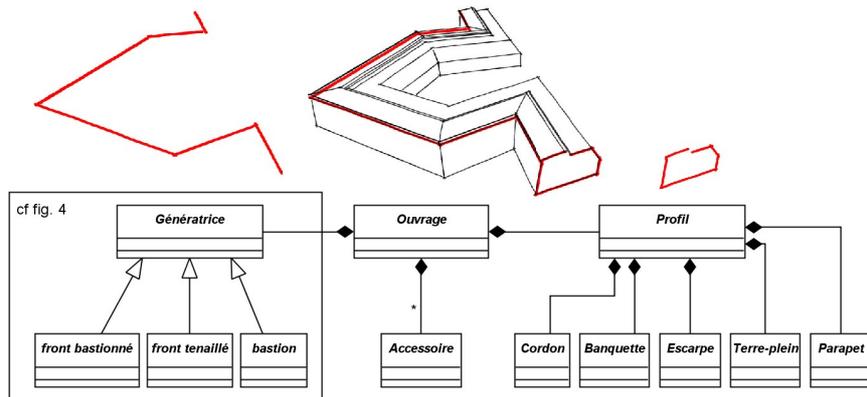


figure 3: Structure générale des ouvrages en fortification bastionnée.

L'ontologie a aussi permis de distinguer géométriquement trois types d'ouvrages en fonction des segments (et des angles) formant la génératrice au niveau de la tête des ouvrages c.-à-d. du côté de l'ouvrage exposé à l'ennemi. Les segments (figure 4) composant les différentes têtes d'ouvrages (figure 5) sont au nombre de trois: courtine, face et flanc. Un ouvrage dont la génératrice forme un front bastionné au niveau de la tête est donc construit de deux demi-bastions – chacun composé d'une face et de son flanc, (formant l'angle de l'épaule) – reliés par une courtine. Pour la plupart des ingénieurs, la distance séparant un flanc de la face du demi-bastion opposée ne doit pas dépasser 120 toises, portée maximale du mousquet et distance en deçà de laquelle la face ne peut être protégée par le flanc. Les longueurs et les angles qui caractérisent les autres lignes sont aussi déterminées par des contraintes défensives et il en va de même de tous les ouvrages de fortification bastionnée.

Outre le front bastionné, les deux autres têtes sont le front tenaillé dans lequel les faces forment un angle rentrant (ouvrages à tenaille) et le bastion dans lequel les faces forment un angle saillant (figure 5).

Le profil, quant à lui, est constitué de quatre parties : un parapet et une banquette reposant sur un terre-plein et délimitée par une escarpe. Le profil varie très peu d'un ingénieur à un autre mais aussi d'un ouvrage à un autre.

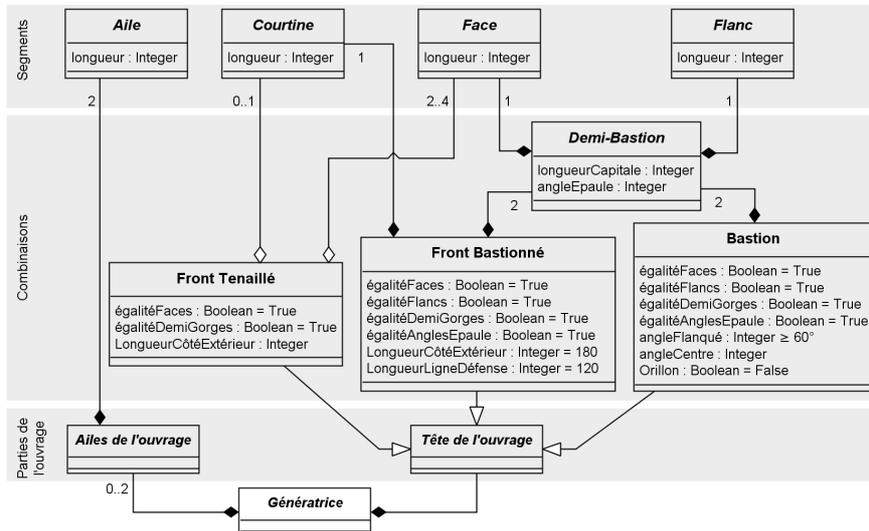


figure 4: Un ouvrage (l'enceinte de ville) et ses segments formant la magistrale qui sert de génératrice à la modélisation.

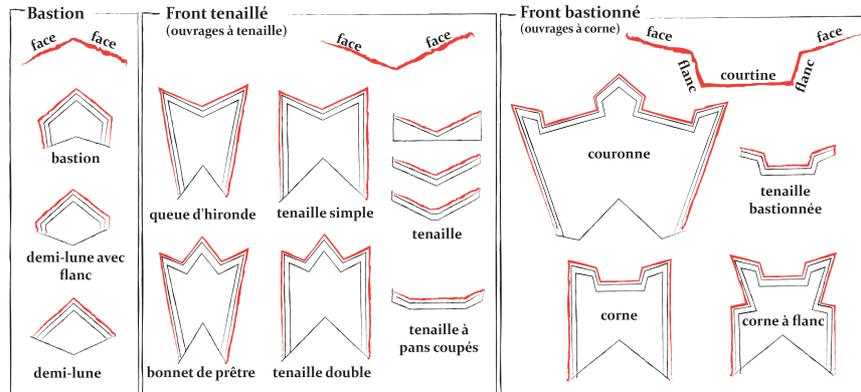


figure 5: Plans des principaux ouvrages classés selon leurs têtes

Implémentation et résultats

Plusieurs ouvrages ont d'ores et déjà été modélisés. Ces objets sont implémentés sur Grasshopper en suivant la structure de l'ontologie. Leurs valeurs ou plages de valeurs théoriques sont héritées des traités et mis en situation sur le plan-relief de Toul mais aussi sur ceux de Marsal, Metz, Strasbourg et Verdun. Le processus de modélisation est pour le moment manuel : les objets sont adaptés sur les données relevées en faisant varier les paramètres (Jacquot et al., 2011).

L'enceinte, clef de voûte de tout système fortifié est entièrement modélisée à partir du positionnement manuel des sommets du polygone englobant la magistrale (p. ex. neuf points pour Toul). Le rempart est modélisé par balayage le long de la génératrice (magistrale) comme cela a été décrit précédemment. Les résultats sont très satisfaisants car le modèle paramétrique obtenu est très proche du relevé laser et cela, avec très peu d'ajustements (front AB, figure 6). La modélisation d'autres ouvrages a pu être réalisée, notamment les ouvrages ou les demi-lunes, puisqu'ils reprennent quelques unes des caractéristiques de la magistrale de l'enceinte telles que le tracé en front bastionné et la présence d'un profil remparé comme l'a mis en avant l'ontologie.

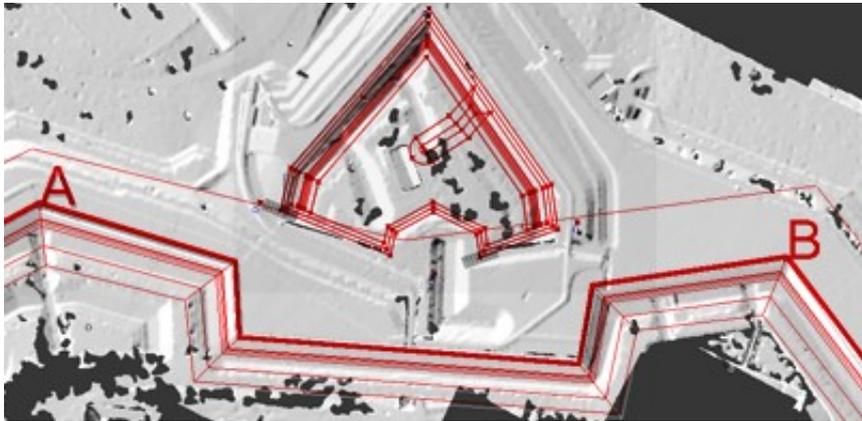


figure 6: Détail de la reconstruction paramétrique sur le front AB et de sa demi-lune .

Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons vu que les enjeux liés à la numérisation, à la modélisation et à la valorisation des plans-reliefs nécessitent l'apport de sources documentaires en complément des données relevées. A la vue des expérimentations déjà réalisées, ces documents s'avèrent plus que suffisants pour poursuivre le projet de modélisation tridimensionnelle. De plus, leur contenu nous donne les clés d'une discipline complexe étant donné la quantité de concepts manipulés et de relations qu'ils entretiennent. Seul le développement d'un modèle ontologique nous permet d'organiser ce vaste corpus de connaissances.

Cette ontologie est également la première pierre d'un développement plus important du projet de numérisation. En premier lieu du point de vue de la modélisation. Il est possible d'automatiser le processus de recons-

truction d'une manière similaire à ce qu'il a été déjà fait pour les bâtiments des plans-reliefs (Chevrier et al., 2011). Enfin, l'ontologie a vocation à venir enrichir sémantiquement le modèle virtuel afin de satisfaire les exigences muséographiques (multimédia, supports de diffusion,...).

Bibliographie

- Balliet, J.-M. (2009). Bibliographie artillerie & fortifications.
- Le Blond, G. (1756). *Elémens de fortification [...]*. Paris : L. Cellot.
- Cantzler, H., Fisher, R.B., & Devy, M. (2002). Improving architectural 3D reconstruction by plane and edge constraining. *Proceedings of British Machine Vision Conference*, 43-52.
- Chevrier, C., Jacquot, K., & Perrin, J.P. (2011). Modelling specificities of a physical town scale model. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Digital Media and its Applications in Culture Heritage*, Amman, Jordanie.
- Cruz, C., Marzani, F., Karmacharya, A. & Boochs, F. (2008). Reconstruction 3D sémantique d'objets architecturaux. *Magazine uB*.
- Havemann, S. & Fellner, D.W. (2004). Generative Parametric Design of Gothic Window Tracery. In *Proceedings of the Shape Modeling International*, Gêne, Italie.
- Humbert, P., Chevrier, C. & Bur, D. (2011). Use of a Real Time 3D Engine for the visualization of a Town Scale Model Dating from the 19th Century. Prague, République tchèque.
- Jacquot, K., Chevrier, C., & Halin, G. (2011) Study of the Fortification of old scale models in order to automate their 3D modelling. In *Digital Aids to Design Creativity - eCAADe 29*, 967-976, Ljubljana, Slovénie.
- Luca, L. de, Véron, Ph. & Florenzano, M. (2007). A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements. *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics* 23, pp. 181–205.
- Murphy, M., McGovern, E. & Pavia, S. (2011). Historic Building Information Modelling - Adding Intelligence to Laser and Image Based Surveys. In *Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop*, Vol. XXXVIII-5/W16, Trente, Italie.
- Orgeix, E. d'. (2009). Fortifications et traités d'architecture militaire français (XVIIe-XVIIIe siècles). *Les Nouvelles de l'INHA*, 24.
- Remondino, F. & El-Hakim, S. (2010). Image-based 3D modeling: a review. In *The Photogrammetric Record Journal*, Vol. 21, 269–291.
- Schinko, C., Strobl, M., Ullrich, T. & Fellner, D. (2010). Modeling Procedural Knowledge: A Generative Modeler for Cultural Heritage. In *Proceedings of EuroMed 2010, 8th Digital Heritage*, 153–165, Chypre, Limassol.
- Virol, M. (2003). *Vauban : de la gloire du roi au service d'état*. Seyssel : Champ Vallon.