

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

ÉCOLE DOCTORALE IAEM Lorraine
DFD Informatique
MAP-Crai (UMR 3495 CNRS MCC)
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

Thèse pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université de Lorraine Discipline : Sciences de l'architecture

présentée et soutenue par

Kévin JACQUOT

Soutenance publique le 28/02/2014

Numérisation et restitution virtuelle des maquettes de la collection de Louis XIV

Le cas des fortifications bastionnées

Rapporteurs	M. Philippe FLEURY	Professeur des Universités. Directeur du CIREVE (Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle). HDR. Université de Caen
	M. Marc DANIEL	Professeur des Universités. Responsable du projet G-MOD au LSIS. HDR. Aix-Marseille Université
Examineurs	M. Pierre GRUSSENMEYER	Professeur des Universités. Département Génie Civil –Topographie. HDR. INSA Strasbourg
	M. Philippe PROST	Professeur des écoles d'architecture Paris-Belleville. Membre du Conseil scientifique du Réseau des sites majeurs de Vauban
	M. Sylvain PETITJEAN	Directeur de recherche Inria Nancy - Grand Est. HDR. Nancy
Directeur	M. Gilles HALIN	Maître de conférences en Informatique. Responsable scientifique du Laboratoire MAP-CRAI. HDR. Université de Lorraine
Co-directeur	Mme Christine CHEVRIER	Docteur en Informatique. Chercheur au Laboratoire MAP-CRAI. ENS Architecture Nancy
Invitée	Mme Isabelle WARMOES	Historienne de la fortification. Ingénieur d'études au Musée des Plans-reliefs. Paris

Résumé

Au cours de la dernière décennie, de nombreux projets de numérisation de maquettes d'architecture ont été menés. Pour apporter une réponse aux enjeux patrimoniaux de préservation et de diffusion, ces projets doivent d'abord surmonter les limites des techniques d'acquisition tridimensionnelle. Les données acquises lors du relevé, aussi bien par photogrammétrie que par capteurs laser, ne sont pas suffisantes pour restituer virtuellement la géométrie des maquettes du fait des caractéristiques uniques de ces objets (échelle, superficie, quantité, état de conservation, densité et standardisation des objets présents sur les maquettes, etc.). Classée Monument historique, la collection des plans-reliefs comprend une centaine de maquettes réalisées au 1/600 et représentant les places fortifiées des frontières du territoire français du XVIIe au XIXe siècle. Ces maquettes ne sont pourtant qu'une fraction aujourd'hui à être exposées, essentiellement par manque de place. La création de modèles virtuels de plans-reliefs est une réponse adaptée aux enjeux de préservation et de valorisation d'un patrimoine riche, mais méconnu. Les fortifications représentées sur les plans-reliefs constituent un cas d'étude idéal pour une reconstruction virtuelle mettant à profit les connaissances d'un domaine spécifique.

Notre approche, intitulée KASToR (*Knowledge based Approach : from Scale Model To 3D Replica*) s'appuie sur l'étude de textes théoriques pour définir et organiser les différents concepts (ouvrages, règles de construction, etc.) de la fortification bastionnée. Après avoir modélisées ces connaissances sous la forme d'une ontologie, chacun des concepts est identifié et les relations qu'ils entretiennent définies. L'étape suivante est l'implémentation d'algorithmes visant à la modélisation géométrique des principaux ouvrages de fortification. Regroupés dans une bibliothèque d'objets paramétriques, ces différents composants permettent de construire la plupart des ouvrages de fortification présents sur les plans-reliefs par l'ajustement de paramètres propres à chaque ouvrage. Ces ajustements, d'abord réalisés manuellement sur les différentes sources dont nous disposons, sont ensuite automatisés pour améliorer la précision et la vitesse de la reconstruction. Ainsi est mise en œuvre une rétroconception des plans-reliefs dont la première étape consiste en une segmentation géométrique des relevés pour regrouper des séries de points selon des entités appartenant à la géométrie du plan ou de l'espace (segment, sphère, etc.). Puis, ayant extrait un modèle simplifié des nuages de points sous la forme de courbes de niveau, il est possible de procéder à une segmentation sémantique au cours de laquelle on cherche à regrouper les courbes de niveau selon des entités appartenant au domaine de la fortification bastionnée et présentes dans la bibliothèque. L'analyse des courbes de niveau au regard du modèle de connaissance permet l'extraction des différents ouvrages de fortification. La reconstruction est ensuite assurée par l'ajustement automatique des objets de la bibliothèque paramétrique aux données segmentées.

Mots Clefs : Patrimoine, Plans-reliefs, Fortifications bastionnées, Acquisition tridimensionnelle, Réplique virtuelle, Rétroconception, Segmentation, Modélisation paramétrique.

Abstract

Over the last ten years, there has been a significant increase in the amount of projects dealing with scale models digitizing. As a respond to cultural heritage issues regarding preservation and diffusion, these projects have to overcome 3D digitizing limits. Whether it be thanks to lasergrammetry or photogrammetry, the raw data from the digital acquisition are insufficient for geometrical reconstruction because of the unique characteristics of scale models (scale, area, amount, state of conservation, density and standardization of the objects on the model, etc.). The collection of *plans-reliefs*, which is classified *Monument historique*, includes a hundred 1/600-scale models depicting the strongholds of the French borders from the 17th to the 19th century. Today, few of these scale models are exposed, essentially because no display space is available. Virtual models of *plans-reliefs* is an appropriate response to the preservation and valorization of an extraordinary but little known heritage. The fortifications on the scale models are a perfect case study for a virtual reconstruction based on the knowledge of a specific domain.

Our approach: KASToR (Knowledge based Approach: from Scale Model To 3D Replica), is based on the study of theoretical materials in order to define and model the different concept (works, construction rules, etc.) of bastioned fortification. Once this knowledge has been model in the form of an ontology, every concept is identify and their relations are made explicit. The next step is the implementation of algorithms for the geometrical modeling of the main fortification works. Gathered in a library of parametric objects, these components allow us to reconstruct most of the fortification works on the scale models using adjusting parameters. At first, the adjustments were made manually onto the available reference documents. But now, they are automated with the aim of improving both accuracy and modeling speed. Therefore, the reverse engineering process of the *plans-reliefs* consists of the geometrical segmentation of the 3D surveys in which points are clustered according to entities belonging to the plane or to space (segments, spheres, etc.). Hence, a simplified model consisting of contour lines is extracted from the points cloud. It is then possible to perform a semantic segmentation to identify and cluster the lines belonging to bastioned fortification field. The analysis of the contour lines thanks to the knowledge model allows the extraction of the different fortification works. The 3D reconstruction is finally done by the automatic adjustment of the parametric objects of the library onto the segmented data.

Keywords: Cultural Heritage, Plans-Reliefs, Bastioned Fortifications, 3-Dimensional Digitizing, Virtual Replica, Reverse Engineering, Segmentation, Parametric Modeling.

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement d'un projet de recherche commencé il y a près de trois ans au Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (CRAI). Elle n'aurait pu être menée à terme sans le concours de nombreuses personnes que je tiens à remercier.

Je remercie tout d'abord Gilles Halin, Maître de conférences en Informatique à l'Université de Lorraine, d'avoir accepté de diriger cette thèse. Son aide précieuse, sa disponibilité, sa pédagogie ont été déterminantes dans la conduite de cette thèse. Je ne saurais trop remercier Christine Chevrier, codirectrice de ce mémoire, de m'avoir donné l'opportunité de poursuivre les réflexions entamées lors de mon stage de M2.

Je tiens à remercier les membres, anciens ou actuels, du Crai. Jean-Pierre Perrin et Alain Fuchs pour m'avoir montré, même indirectement que les études en architecture peuvent se poursuivre par un doctorat. Je remercie aussi Daniel Léonard, Pascal Humbert et Françoise Schatz d'avoir pris le temps de promulguer leurs conseils dans leurs domaines d'expertises respectifs. Enfin, Vincent Marchal et Alain Caprion pour leur disponibilité et leur sympathie.

J'adresse également mes remerciements à Isabelle Warmoes du Musée des Plans-reliefs pour sa disponibilité et ses conseils. Merci également à Monique Fuchs de m'avoir ouvert les portes du Musée Historique de Strasbourg à plusieurs reprises.

Je remercie également les différents étudiants ayant participé au projet de numérisation des plans-reliefs et en particulier Frédéric Giraud pour son implication et le sérieux de son travail. Je remercie également mon collègue de recherche Mohamed Anis Gallas, avec qui j'ai passé quatre ans d'intenses échanges sur des sujets aussi variés que passionnants. Merci également à Tommy Messaoudi, à Daniel Zignale et à Mathieu Lamour pour les moments passés ensemble. Enfin, merci à mes amis de promotion : Hervé, Mathieu, Hervé, Charles, Sam, Julien et PH pour les rares, mais précieux, weekends loin du labo.

Je pense particulièrement à ma famille qui m'a soutenu de manière inconditionnelle tout au long de mes études et notamment mes parents Nathalie et Dominique et mon frère Gwénaël.

Merci à Delphine, pour sa présence et son soutien infailible.

Sommaire

Résumé	1
Remerciements.....	5
Introduction	11
Partie A. La numérisation de plans-reliefs	17
Chapitre I. Le patrimoine des plans-reliefs	19
I.1. Un exemple de la diversité du patrimoine : les plans-reliefs.....	19
I.2. Objectifs de la numérisation du patrimoine et des maquettes d'architecture.....	24
I.3. Conclusion sur les maquettes et leur pouvoir de séduction.....	27
Chapitre II. Les approches pour le relevé tridimensionnel du patrimoine architectural	29
II.1. Les techniques d'acquisition actives et passives.....	30
II.2. La lasergrammétrie et la projection de lumière	32
II.3. La Photogrammétrie	37
II.4. Choix d'une méthode pour la numérisation du patrimoine	40
Chapitre III. Rétroconception d'objets architecturaux.....	45
III.1. Origine de la rétroconception	46
III.2. Traitements préliminaires : consolidation, nettoyage et maillage.....	47
III.3. Segmentation des données	48
III.4. La modélisation paramétrique pour le patrimoine architectural.....	51
III.5. Modélisation des connaissances architecturales.....	55
III.6. Bénéfices de la rétroconception appliquée au patrimoine	59
Chapitre IV. Échantillon de projets de numérisation de plans-reliefs	63
IV.1. Création de modèles virtuels de la Rome antique.....	65
IV.2. Virtual Leodium – <i>La cité de Liège vers 1730</i>	69
IV.3. Le projet Nantes 1900	70
IV.4. PRAM, Le Projet Relief Auguste Magnin (Genève)	72
IV.5. La maquette virtuelle de Langweil (Prague)	73
IV.6. La maquette virtuelle d'Hambourg	74
IV.7. Les reliefs de paysages suisses	75
IV.8. Autres projets de numérisation de maquettes	77
IV.9. Résultats des projets de numérisation de maquettes	81

Partie B. Reconstruction des fortifications de plans-reliefs.....	87
Chapitre I. La collection des plans-reliefs de Louis XIV	89
I.1. Les plans-reliefs et les fortifications bastionnées.....	89
I.2. La collection aujourd'hui	96
Chapitre II. Proposition d'une approche basée sur les connaissances pour la reconstruction des plans-reliefs : le cas des fortifications bastionnées.....	99
II.1. Automatisation de la reconstruction paramétrique des bâtiments présents sur les plans-reliefs	99
II.2. Introduction à la rétroconception des fortifications des plans-reliefs.....	100
Chapitre III. Acquisition tridimensionnelle de plans-reliefs	107
III.1. Facteurs influents l'acquisition tridimensionnelle des plans-reliefs	107
III.2. Première session d'acquisition – plan-relief de Toul.....	110
III.3. Seconde session d'acquisition – plans-reliefs de Toul et Strasbourg.....	112
III.4. Bilan de l'acquisition de données tridimensionnelles de plans-reliefs	113
Chapitre IV. Les traités d'architecture militaire et la modélisation de connaissances	115
IV.1. Traités et fortification bastionnée	115
IV.2. Choix des traités	120
IV.3. Organisation des connaissances dans les traités de fortification	122
IV.4. Modélisation de la connaissance sur la fortification bastionnée	130
Chapitre V. Prototype et expérimentation pour la reconstruction des fortifications des plans-reliefs.....	139
V.1. Prototypage sur Grasshopper	140
V.2. Implémentation et expérimentations des trajectoires théoriques des ouvrages de fortification bastionnée.....	144
V.3. Ajustement manuel des trajectoires des ouvrages précédents à des données extérieures ...	166
V.4. Extraction automatique des données nécessaires à la reconstruction des ouvrages de fortification.	169
V.5. Résultats de l'extraction des trajectoires	190
V.6. Reconstruction des trajectoires et ajustements finaux.....	199
V.7. Bilan et perspectives pour le prototype.....	201
Conclusion.....	207
Bibliographie	213
Index.....	233
Annexe	235

Introduction

La préservation et la diffusion du patrimoine matériel culturel ont pris ces dernières années une dimension nouvelle grâce à la numérisation. L'archivage numérique et la diffusion à grande échelle et à moindre coût sur internet contribuent à la préservation et à la démocratisation de l'accès à la culture. Enfin, la valorisation par l'enrichissement sémantique est rendue possible par les technologies de l'information et de la communication, amplifiant l'accessibilité du patrimoine.

Patrimoine exceptionnel, la collection des plans-reliefs est constituée d'une centaine de maquettes pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres carrés. Ce sont des maquettes de places fortes implantées aux frontières françaises entre le XVII^e et le XVIII^e siècle. Témoins de la formation du territoire, seule une fraction de la collection est exposée.

Problématique de recherche

Dans le domaine de la valorisation et de la numérisation du patrimoine, le processus de création de modèles tridimensionnels bénéficie d'outils d'acquisition tridimensionnelle qui permettent d'accomplir de manière rapide et automatique des relevés d'objets de toutes tailles. Néanmoins, les données générées sont volumineuses, indifférenciées et incomplètes. Ces dernières années, le domaine du patrimoine architectural a pu bénéficier des avancées de la recherche dans le champ de l'acquisition tridimensionnelle. Les techniques et outils de numérisation permettent maintenant d'accomplir rapidement, automatiquement et à moindre coût des relevés précis. Toutefois, les données produites par ces approches présentent encore de nombreux inconvénients. Trop volumineuses pour être directement utilisées dans la plupart des applications de valorisation, les données relevées ne permettent pas pour autant une parfaite reconstruction virtuelle des objets numérisés. Les propriétés de leurs matériaux (réflectivité, rugosité, etc.), la présence éventuelle de masques, de discontinuités, le niveau de détail et la dimension de l'objet étudié sont en effet des facteurs à prendre en compte quelle que soit la technique d'acquisition choisie. Enfin, les données brutes du processus d'acquisition n'ont pas de sens et seule une intervention *a posteriori* permet d'isoler, de qualifier et d'interpréter sémantiquement les objets présents dans le relevé (bâtiments, fenêtres, toits, fortification, etc.). Pour répondre à ces nombreuses limites, le processus de numérisation peut être appréhendé différemment, notamment en s'appuyant sur des techniques largement diffusées dans d'autres domaines comme la modélisation paramétrique (conception architecturale) ou la rétroconception (mécanique).

Des logiciels commerciaux permettent de reconstruire des éléments géométriques simples (plan, sphère, cylindre, etc.) à partir de nuages de points préalablement segmentés, mais aucune bibliothèque d'éléments architecturaux n'est disponible. Des recherches sont en cours afin d'extraire et de reconstruire automatiquement des objets architecturaux amalgamés dans les nuages de points. Malgré quelques propositions, la segmentation et la reconstruction architecturale d'objet du domaine n'en sont encore qu'à leurs débuts. Les objets architecturaux peuvent être décrits de manière paramétrique et venir enrichir une biblio-

thèque d'objets réutilisables. Outre l'étude du domaine pour en extraire les différents concepts et relations les unissant, l'étape la plus importante et la plus fastidieuse reste l'ajustement de l'objet architectural aux données numérisées. L'expérience du MAP-CRAI en modélisation tridimensionnelle paramétrique d'objets architecturaux nous conduit naturellement à faire converger les deux domaines de recherches que sont l'acquisition 3D et la modélisation 3D en architecture. Même s'il reste encore peu probable d'obtenir automatiquement une scène virtuelle composée d'éléments architecturaux entièrement paramétrés, il est envisageable d'automatiser certaines étapes et de limiter le rôle de l'humain à quelques interventions ponctuelles.

L'objectif de notre recherche est donc d'améliorer les outils et les méthodes d'acquisition existants en ayant recours à des outils de modélisation tridimensionnelle paramétrique fondés sur les connaissances de l'objet étudié qui ont été préalablement formalisées. L'adaptation du modèle paramétrique théorique à un cas réel, donc imparfait, et l'automatisation de ce processus constituent les enjeux originaux de notre travail. Appliqués à la numérisation des plans-reliefs et en particulier à la reconstruction de fortifications bastionnées présentes sur les maquettes, ces enjeux apparaissent d'autant plus complexes que l'échelle de l'objet étudié influence considérablement la qualité des données relevées. Enfin, la création d'objets paramétriques de fortification bastionnée n'est possible que si la connaissance de cette science éphémère nous est parvenue. L'approche que nous mettons en oeuvre est une rétroconception des fortifications présentes sur les plans-reliefs. À partir de l'étude de textes théoriques de fortification, il est possible de définir une ontologie rendant compte des ouvrages fortifiés et de leurs relations. Cette connaissance est essentielle à la segmentation sémantique des données relevées lors de l'acquisition tridimensionnelle. Une fois segmentée, il est possible de reconstruire virtuellement les ouvrages fortifiés numérisés. Les modèles 3D résultants sont alors dépourvus des imperfections des modèles numérisés (volume de données excessif, absence de sémantique, approximations géométriques, etc.).

Plan de la thèse

Notre rapport se structure en deux parties. Dans la première partie, nous exposons le contexte de la recherche ainsi que l'état de l'art relatif aux questions de la numérisation et de la modélisation tridimensionnelle dans le domaine patrimonial. Dans la seconde partie, une nouvelle approche pour la numérisation d'objets issus du patrimoine architectural est proposée avant de poursuivre avec les expérimentations menées sur notre cas d'étude : les fortifications bastionnées présentes sur les plans-reliefs.

Partie A. Cette première partie rappelle le contexte de notre étude et dresse un état de l'art des approches pour la numérisation du patrimoine.

- Chapitre I. Ce chapitre a pour objet de rappeler la diversité du patrimoine et en particulier du patrimoine culturel architectural. Après avoir donné quelques éléments de définition sur la notion de patrimoine, nous montrons que la nature même de la maquette d'architecture en fait un patrimoine unique.

Pour répondre à la mission de transmission et de préservation du patrimoine, la numérisation des maquettes pour la création de représentations virtuelles et de contenus numériques est finalement introduite.

- Chapitre II. Dans ce chapitre, les techniques d'acquisition tridimensionnelle, première étape du processus visant à la modélisation géométrique virtuelle d'un objet réel, sont présentées. Après une courte introduction, notre propos se concentre sur le domaine d'application patrimonial et sur les récentes avancées des techniques de photogrammétrie. La dernière partie du chapitre est l'occasion de rappeler l'influence de certains facteurs dans le choix de la meilleure technique pour la conduite de projet de numérisation d'objets patrimoniaux, mais aussi d'établir le constat que l'acquisition seule ne permet pas de produire des données directement exploitables pour la valorisation patrimoniale.

- Chapitre III. Ce chapitre aborde la question de la rétroconception appliquée aux objets patrimoniaux numérisés. La rétroconception est présentée comme un processus complet permettant de transformer les données brutes de l'acquisition en objets sémantiques capables de répondre au constat établi dans le chapitre précédent. Certaines étapes de la rétroconception sont maîtrisées dans le domaine de la numérisation patrimoniale. Sa filiation avec la modélisation paramétrique est également établie

- Chapitre IV. Dans ce chapitre, un état des lieux des projets de numérisation de maquettes est mené. L'étude de ces projets permet de distinguer deux types de projets : ceux visant en la création d'un modèle virtuel de la maquette et ceux dont l'objet est la création d'un modèle virtuel de la ville représentée. On met également en évidence l'impact des caractéristiques des maquettes sur la numérisation. Ce chapitre est donc l'occasion de comparer les méthodes employées pour la numérisation et les processus de reconstruction géométrique qui ont déjà pu être utilisés dans des projets dont les objectifs concordent avec les nôtres : la création d'un modèle 3D enrichi sémantiquement de maquettes.

Partie B. Cette seconde partie présente notre approche, le prototype et les résultats des premières expérimentations.

- Chapitre I. Dans ce chapitre sont explorées les motivations pour la numérisation des plans-reliefs appartenant à la collection des Invalides. Pour ce faire, il est essentiel de rappeler l'histoire et les caractéristiques des plans-reliefs, ce qui nous permet de comprendre les enjeux uniques de la collection aujourd'hui (échelle, taille, nombre de maquettes, etc.).

- Chapitre II. Ce chapitre est une présentation de la méthode proposée pour la création de modèles géométriques paramétriques répondant aux limites des données numérisées sur les plans-reliefs. À cet effet, il repositionne d'abord notre proposition dans sa filiation aux travaux antérieurs du laboratoire MAP-CRAI sur la reconstruction virtuelle par modélisation paramétrique, mais aussi par rapport aux autres travaux menés en parallèle sur la reconstruction virtuelle de maquettes d'architecture. La méthode proposée est ensuite décrite en détail, étape par étape.

- Chapitre III. Le sujet de ce chapitre est l'acquisition tridimensionnelle des plans-reliefs. De nombreux facteurs sont à prendre en compte pour mener à bien le relevé de ces maquettes. Après les avoir recensés, notamment grâce à l'étude de projets similaires, les différentes sessions d'acquisition que nous avons entreprises sont présentées. Les résultats de ces sessions sont ensuite présentés et commentés.

- Chapitre IV. Dans ce chapitre sont présentés les traités d'architecture militaire. Ces ouvrages sont essentiels à la rétroconception des plans-reliefs et plus particulièrement pour à la création d'une bibliothèque d'objets paramétriques de fortification bastionnée. Après avoir rappelé les caractéristiques de ce genre littéraire et les spécificités des traités dont le sujet est l'architecture militaire, l'étude d'un corpus restreint nous permet d'explicitier les principes et les règles de construction de la fortification bastionnée sous la forme d'une ontologie, un modèle de connaissance de la fortification bastionnée.

- Chapitre V. Ce dernier chapitre est l'occasion d'appliquer et d'expérimenter la méthode proposée sur les différents relevés à notre disposition. Le prototype de rétroconception présenté procède en plusieurs étapes qui sont reprises dans la structure du chapitre. Grâce à l'ontologie de la fortification, la création d'une bibliothèque d'objets paramétriques comprenant les tracés théoriques régulateurs des ouvrages et les composants d'ajustement interactif de ces derniers est implémentée et testée. Ensuite, la nécessité d'automatiser le processus de rétroconception se traduit par la mise en place d'une série d'algorithmes de segmentation et de reconstruction géométriques. Mettant encore une fois à profit la connaissance en fortification bastionnée, il devient possible d'extraire les données nécessaires à la reconstruction des ouvrages de fortification. Ce chapitre est ainsi l'occasion d'examiner les modalités de la rétroconception appliquée aux plans-reliefs, et notamment les spécificités de Grasshopper : l'environnement choisi pour l'implémentation des différents algorithmes.

Finalement, une conclusion propose un bref récapitulatif du travail présenté dans se mémoire. Après avoir rappelé le contexte de notre étude, ses enjeux et ses limites, les résultats obtenus dans le chapitre V nous permettent de définir les perspectives futures du projet de reconstruction virtuelle des plans-reliefs.

Partie A. La numérisation de plans-reliefs

La collection des plans-reliefs fait partie de ce patrimoine atypique et multi facettes que sont les maquettes historiques. Documents sur la formation des frontières françaises et de ses places fortes à différentes époques, les plans-reliefs sont aussi indissociables d'autres grands thèmes du patrimoine tels que l'œuvre de Vauban, Louis XIV et le Grand Siècle, etc. Dans cette première partie, les plans-reliefs et plus généralement, la représentation de l'architecture par l'utilisation de maquettes est présentée pour rappeler que ce support de communication (Cotte, 2004) se distingue par sa complexité dans le cadre de projets de numérisation.

La notion de patrimoine est d'abord explorée dans le Chapitre I afin de comprendre la place que les maquettes historiques peuvent y tenir. Après une courte présentation de ce mode de représentation enrichi d'exemples remarquables, l'intérêt des nouvelles technologies pour répondre à la mission de ce patrimoine est exploré.

Dans le Chapitre II, les techniques d'acquisition tridimensionnelle sont présentées. On s'attache notamment à montrer les avancées significatives des techniques de photogrammétrie. Dans la conduite d'un relevé tridimensionnel, il est encore nécessaire de traiter les données précédemment acquises. Ce point est développé dans le Chapitre III avec les outils de modélisation utilisés dans le domaine de la conception assistée par ordinateur. Souvent opposées à la modélisation reposant sur la réalité (à partir de relevés), les technologies utilisées en conception ont une place importante dans les traitements appliqués aux données acquises par numérisation.

Enfin, dans le Chapitre IV est mise en avant une sélection de projets de numérisation d'anciennes maquettes. Cette partie est l'occasion de distinguer les différentes approches choisies pour répondre aux enjeux et aux objectifs de tels projets.

Chapitre I. Le patrimoine des plans-reliefs

Le patrimoine est un concept dont les limites n'ont de cesse d'évoluer. Il peut se présenter sous des aspects divers : naturel, matériel ou encore immatériel, mais a toujours vocation à être préservé et transmis d'une génération à l'autre. La richesse du patrimoine peut s'exprimer à travers des exemples exceptionnels comme les maquettes anciennes d'objets architecturaux – des modèles tridimensionnels et à échelle réduite représentant des scènes d'une époque passée – et pour lesquelles des mesures de protection et de valorisation sont mises en place. La partie I.1 examine ainsi les liens existants entre les notions de patrimoine et de maquettes en tant que mode d'expression architectural.

Les maquettes anciennes et plus particulièrement les plans-reliefs sont très sensibles aux affres du temps. De plus, du fait de leurs caractéristiques, nombreuses sont les contraintes pouvant entraver l'exposition de ces objets. Dans la partie I.2, la numérisation et la création de représentations virtuelles et de contenus numériques sont présentées comme des moyens de répondre aux enjeux portés par ce patrimoine, tant en terme de préservation que de transmission.

I.1. Un exemple de la diversité du patrimoine : les plans-reliefs

Le 22 juillet 1927, la collection de 101 plans-reliefs est classée au titre des monuments historiques (base Palissy). Le classement au titre objet reconnaît ainsi à la collection des plans-reliefs « un intérêt public au point de vue de l'histoire, de l'art, de la science ou de la technique » (art. L622-1). La notion de patrimoine¹, dans sa filiation aux notions de monuments et monuments historiques² (Choay, 2009, p. III), fait l'objet de nombreuses questions dont la première reste le problème de la définition :

« Parce qu'il est grandiose, beau, ancien, ou rien de tout cela, mais tout simplement menacé de disparaître ou coûteux à détruire, le monument historique devient « ce qu'il nous faut conserver » et se confond alors avec la notion de patrimoine. »

(Melot, 1999)

I.1.a. Le contexte patrimonial : définitions

Nombreux sont les chercheurs - Françoise Choay (1996), André Chastel (2008), Michel Melot (2005), Régis Debray (1999) entre autres – à étudier le patrimoine, ses dérives, ses enjeux, etc., et à en proposer des définitions (Frayse, 2008). De ces débats, une caractéristique invariable du patrimoine demeure : il s'agit de la « notion d'héritage, de transmission des biens aux descendants » (Besnard, 2008) :

¹ L'expression « patrimoine culturel » apparaît en 1972, dans la Convention de l'UNESCO (Melot, 2012).

² Le mot qui apparaît en français en 1790, au début des destructions révolutionnaires (Vallet, 1999).

« Le patrimoine est considéré comme l'ensemble de tous les biens, naturels ou créés par l'homme, matériels ou spirituels, sans limites de temps ni de lieu, qu'ils soient simplement hérités des ascendants et ancêtres des générations antérieures ou réunis et conservés pour être transmis aux descendants des générations futures. »

(Desvallées, 1995)

Le concept de patrimoine est indissociable des notions de préservation et de transmission. Une première réponse à ces enjeux est le classement du patrimoine au titre des monuments historiques, à l'échelle nationale comme on l'a vu précédemment, ou en tant que patrimoine mondial par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), à l'échelle internationale. En 2003, une convention pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel (langue, musique, us et coutumes, croyances, par exemple) est ratifiée par les 195 membres³ de l'UNESCO. Elle vient en complément du dispositif initial de la convention du patrimoine mondial, qui reconnaissait le patrimoine naturel et culturel. Cette dernière catégorie nous intéresse d'autant plus qu'elle nous apporte une nouvelle définition du patrimoine. Les monuments⁴ du patrimoine culturel y sont définis comme l'ensemble des :

« œuvres architecturales, de sculpture ou de peinture monumentales, [...] qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de l'histoire, de l'art ou de la science »

(Unesco, 1972)

Le patrimoine est une notion qui ne cesse d'évoluer par glissement sémantique (Choay, 1996) et par souci de représentativité. L'extension de la notion de patrimoine au domaine immatériel répond notamment à un enjeu d'équilibre tant le patrimoine occidental est présent dans la liste du patrimoine mondial grâce au patrimoine culturel matériel monumental en Europe et naturel en Amérique du Nord (Figure 1). En dehors de ces régions, la transmission de biens d'une génération à l'autre concerne un patrimoine d'une nature différente à l'image de « pratiques, représentations, expressions, connaissances et savoir-faire » (UNESCO, 2003).

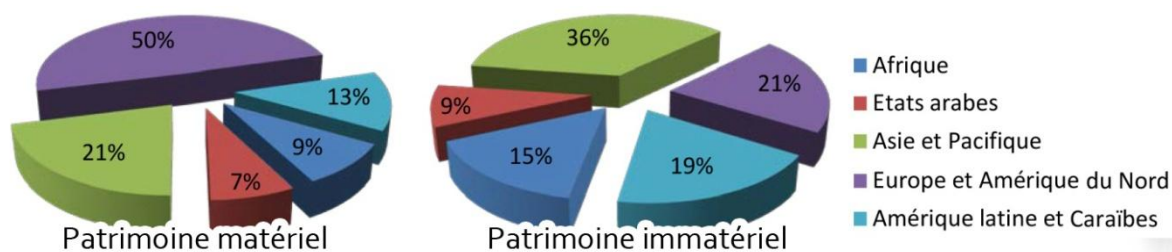


Figure 1. Représentation du patrimoine matériel et immatériel dans les cinq régions définies par l'UNESCO.

D'après : UNESCO

³ Chiffre de 2011 auquel s'ajoutent huit membres associés.

⁴ Les ensembles et les sites sont les deux autres patrimoines culturels selon la définition de la convention.

Notons enfin que les mesures de classement ont évidemment un rôle protecteur aussi bien à l'UNESCO qu'aux Monuments historiques. Dans ce dernier cas, il devient alors impossible de détruire ou de modifier, même dans le cadre d'une restauration, l'objet protégé sans l'accord de l'État par exemple (Loi sur les monuments historiques, 1913). Ainsi, le classement des plans-reliefs répond notamment à la destruction de trois maquettes en 1926, à des menaces de dispersion de la collection en raison de l'abandon de la fortification bastionnée à la chute du Second Empire et à l'arrivée de nouvelles activités dans la galerie des Plans-Reliefs (Polonovski, 1998).

1.1.b. La maquette d'architecture : une représentation architecturale

L'existence de maquettes durant l'Antiquité et le Moyen-âge est attestée, mais c'est au début de la Renaissance que leur nombre se multiplie. La maquette d'architecture devient un moyen essentiel de représentation de l'architecture, un instrument de recherche ou de communication (Cité de l'architecture et du patrimoine, 2011). À la différence des documents graphiques (plans, coupes, élévations, perspectives, esquisses, etc.), les maquettes permettent à l'observateur de choisir son angle de vue. Une autre caractéristique des maquettes est l'échelle qui permet de déterminer le niveau d'abstraction de la représentation. La simplification de certains éléments permet de porter l'attention sur des objets particuliers et de transmettre une information précise (Schilling, 2007). Par exemple, aux 1/1000 et 1/500, les maquettes représentent généralement des espaces urbains où les constructions sont les plus abstraites, car représentées par des polyèdres. Le relief, lorsqu'il est présenté, est retranscrit par des strates horizontales empilées. Ce rapport entre échelle et niveau de détail est une norme contemporaine et de nombreux exemples de maquettes anciennes d'architecture n'en tiennent pas compte (Figure 2). Avec une échelle de 1/600, les plans-reliefs sont donc des maquettes de ville (Pérouse De Montclos, 2000) présentant un niveau de détail très élevé puisque l'on va jusqu'à représenter les menuiseries présentes sur les différentes constructions. Enfin, les échelles plus grandes : 1/200, 1/100, 1/50 sont réservées à la représentation du seul bâtiment, tandis que les autres échelles sont utilisées pour la représentation des espaces intérieurs ou des détails. Toute maquette a un statut pédagogique et même vulgarisateur lié à sa nature descriptive (du présent ou du passé) ou prospective (le futur). D'étude ou de communication, les maquettes permettent l'appréhension de l'architecture en trois dimensions comme aucun autre médium. L'intérêt renouvelé pour les maquettes d'architecture – comme le montre les récents colloques internationaux : *Les Maquettes d'architecture* en 2009 et *La maquette, un outil au service du projet architectural* en 2011 – traduit en particulier une interrogation sur la place de la maquette traditionnelle parmi les représentations tridimensionnelles virtuelles.

Le terme de plan-relief est le résultat de l'utilisation des termes de relief et de plan pour décrire les maquettes de la collection conservée aux Invalides ; le terme plan-relief n'apparaît qu'au XIXe siècle pour la première fois dans les archives du Musée des Plans-Reliefs (Chaslin, 2012). Dans la suite de cette thèse, nous utiliserons le terme plan-relief au sens défini par Jean-Marie Pérouse de Montclos, à savoir : « un plan-relief est une maquette de ville » (Pérouse De Montclos, 2000). Mais pour éviter toute ambiguïté avec

d'autres maquettes de villes, nous limiterons l'usage du terme plan-relief aux seules maquettes de la collection classée Monuments historiques (et par extension, aux copies de plans-reliefs qui ont pu être réalisées). Autant que possible, on utilisera le nom propre des maquettes lorsqu'elles en ont un (*Relief Magnin*, *Plastico di Roma antica* par exemple).

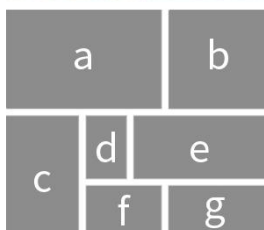


Figure 2. Quelques exemples de maquettes de villes à différentes échelles :

- a. Plan-relief de Neuf-Brisach, 1/600, Musée des Plans-Reliefs, Paris.
- b. *Plastico di Roma Antiqua*, 1/250, Museo della Civiltà Romana, Rome.
- c. *Relief Magnin*, 1/200, Maison Tavel, Genève.
- d. Maquette de Prague de Langweil, 1/480, Muzeum Prahy, Prague.
- e. Maquette d'Hambourg en 1644, 1/1000, Historische Museen Hamburg.
- f. *Port de Nantes en 1900*, 1/450, Château des ducs de Bretagne, Nantes.
- g. *La cité de Liège vers 1730*, 1/1200, Université de Liège, Liège.

Photos : RMN (Musée des Plans-reliefs) / René-Gabriel Ojéda RMNGP (a), Museo della Civiltà Romana (b), Auteur (c), ulg Michel Bolly (d), PRAM (e), Hamburg Museum/Ulrike Pfeiffer (f), Buriánek, 2011 ; Sedlacek, Zara, 2011 (g)

Absent du *Littré* et de l'antépénultième édition du *Dictionnaire de l'Académie française* (parus tous deux dans le dernier quart du XIXe siècle) le terme maquette n'apparaît que dans les années 30 avec l'avant-dernière édition du dictionnaire. Jusqu'alors, le terme utilisé pour décrire une représentation en volume à échelle réduite était modèle (ou modèle d'architecture) (Académie française, 1878 ; Littré, 1873),

seul terme couramment utilisé jusqu'au milieu du XVIIIe siècle (Pérouse De Montclos, 1998). Dans notre étude, le terme maquette désignera le modèle réduit architectural. On lui ajoutera le qualificatif virtuel pour désigner toute réplique numérique d'une maquette. L'objectif est d'éviter toute ambiguïté avec des projets usant du terme « maquette virtuelle » pour désigner la création de modèle virtuel d'objet physique pouvant être ou non une maquette. Ainsi, comme nous le verrons par la suite, de nombreux projets de modélisation de villes ont utilisé parmi leurs références une maquette physique sans pour autant avoir pour objectif la création d'un modèle virtuel de maquette. Notre acceptation diffère dans de Jean Claude Golvin :

« Le mot maquette désigne la représentation d'un monument (ou d'un site) faite en trois dimensions que celle-ci soit réalisée en matériaux (plâtre, plastique, métal, bois) ou électronique (virtuelle), le mot virtuel voulant simplement dire ici « non matériel. »

(Golvin, 2003, p. 26)

La crainte que le virtuel vienne rendre obsolètes les maquettes n'est pas nouvelle. Au début du XIXe siècle, la maquette est en compétition avec la perspective. Cependant, elle reste « utilisée pour exposer publiquement des projets, pour enseigner l'histoire de l'architecture, pour démontrer des dispositifs constructifs ou des procédés de production » (Garric, 2009) comme les maquettes d'Anatole de Baudot dans le cadre du « cours d'architecture médiévale à l'attention des architectes qui comptent se spécialiser dans la restauration monumentale » (Leniaud, 2009).

La collection des plans-reliefs est une des trois grandes collections de maquettes françaises avec la collection de 32 maquettes en plâtre initiée par Baudot en 1898 et conservé au Centre de recherches sur les Monuments historiques et la collection rassemblée par Viollet-le-Duc en 1879 et conservée à la Cité de l'Architecture et du Patrimoine (Pérouse De Montclos, 1998 ; Lotte, 1985). Beaucoup de maquettes ont acquis un statut d'œuvre d'art. Les plans-reliefs ont ainsi rapidement vu leur rôle évoluer d'outil de planification militaire à celui également de symbole de la puissance royale. Sous Louis XIV déjà, elles servent l'image du roi au même titre que la peinture, la sculpture et l'architecture dont le château de Versailles constitue l'exemple le plus connu. Autre exemple : la maquette de Rome de Gismondi : *Plastico di Roma antica*. Financée par Mussolini pour le musée de la Civilisation romaine dans le cadre de l'Exposition universelle de 1942, cette maquette s'inscrit dans la recherche de monumentalité de l'architecture totalitaire des années 30, en participant par la même à la volonté de rassemblement d'un peuple autour d'une mémoire collective (comme celle de la Rome d'Auguste bien que la maquette représente la Rome du début IVe siècle).

Les maquettes telles que les plans-reliefs et les différentes maquettes de Rome sont un patrimoine atypique. Au cours de leur histoire, le message véhiculé par ces objets a évolué. D'outils (du génie militaire ou de synthèse de connaissances), elles sont devenues des œuvres d'art du fait du pouvoir d'évocation et de fascination des modèles réduits (Lévi-Strauss, 1962 ; Golvin, 2003).

L'intérêt patrimonial de ces maquettes est multiple, il tient en partie au médium lui-même, mais aussi à l'image représentée. La maquette est donc un monument-forme qui « s'impose par ses qualités intrinsèques, d'ordre esthétique ou décoratif » (Debray, 1999, p. 31). Une intention artistique a participé à son émergence, elle se traduit pour les plans-reliefs notamment par l'exécution des exemplaires de Brest et de Cherbourg, les plus grands plans-reliefs existants – exceptionnels et d'une grande précision, même parmi les autres représentants de la collection – alors même que ce mode de représentation est désuet du point de vue militaire.

Même si la fonction initiale de ces maquettes a disparu, elles en gardent la trace et revêtent tout de même une fonction testimoniale unique. La dimension historique conférée par la représentation tridimensionnelle d'une restitution du passé, le témoignage que ces maquettes apportent sur une pratique ou une époque et l'utilité qu'elles ont encore aujourd'hui du point de vue scientifique (Prost, 1999, p. 67) en font un monument-trace du fait de leurs « fonctions utilitaires ou de [leur] valeur de témoignage ».

1.2. Objectifs de la numérisation du patrimoine et des maquettes d'architecture

Les éléments de définition évoqués précédemment soulignent l'attention accordée au patrimoine en tant que biens, objets, représentations, etc. devant être préservés et transmis. La révolution numérique (les procédés de numérisation aussi bien que les technologies de l'information et de la communication) ouvre de nouvelles perspectives à ces attentes.

1.2.a. Enjeux de la numérisation du patrimoine culturel

La numérisation du patrimoine constitue un champ d'investissement grandissant pour la plupart des pays européens qui se sont engagés dans ce type de programme (Conseil de l'Europe, 2009). En France, plusieurs programmes de numérisation cohabitent. À côté de ceux des grands établissements nationaux (INA, BnF, RMN, etc.) qui traitent leurs propres fonds, il y a le programme national de numérisation du ministère de la Culture et de la Communication. Lancé en 1996, il concerne les fonds iconographiques, sonores et audiovisuels appartenant à l'État.

En 2003, le projet 3D-Monuments est lancé. Grâce aux avancées technologiques, les objets étudiés sont mieux maîtrisés, tant du point de vue de « leur morphologie que [de] l'organisation des connaissances qui leur sont associées et [de] leur accès » (Berthelot, 2008). Des résultats de ces numérisations sont disponibles en ligne et présagent de la plateforme finale qui autorisera l'enrichissement par des partenaires scientifiques de bases de données associées aux modèles virtuels (MAP, 2007). Aujourd'hui, le projet 3D-Icons⁵ s'appuie et complète les résultats des projets Carare⁶ et 3D-Coform⁷ pour la numérisation d'objets patrimoniaux et permettre l'accès à des modèles virtuels et d'autres contenus numériques sur Europeana⁸, la bibliothèque numérique européenne (D'Andrea et al., 2012)

⁵ <http://3dicons-project.eu>

⁶ <http://www.carare.eu/>

⁷ <http://www.3d-coform.eu/>

⁸ <http://www.europeana.eu/>

I.2.a.a. Préservation du patrimoine par les technologies d'acquisition.

Préserver le patrimoine par l'acquisition tridimensionnelle permet ainsi un archivage numérique. Celui-ci peut être réalisé en prévision d'une restauration, de la possibilité d'altération ou d'une destruction possible d'un site ou d'un objet (excavations archéologiques ou pour le patrimoine en péril) (Pieraccini et al., 2001). Il peut s'agir aussi d'établir une empreinte structurelle pour étudier les évolutions dans le temps d'un objet (Carini, Genna, 2012 ; Tallon, Timbert, 2011 ; Coste, 1998).

Néanmoins, la numérisation du patrimoine se traduit par de grandes quantités de données qui doivent être conservées de manière pérenne. C'est un enjeu fondamental puisqu'à l'inverse des contenus traditionnels dont l'accès ne nécessite aucun instrument, les contenus numériques requièrent une médiation, ou interface, technique pour être lus et consultés. La restitution des contenus numérisés repose en effet sur des outils de lecture aussi bien matériels que logiciels. Ainsi, pour préserver de tels contenus, il faut également « maintenir l'opérationnalité et l'effectivité de la médiation technique » (Bachimont, 2008).

I.2.a.b. Communication et recherche

Le dessein du patrimoine consiste avant tout à être transmis. La diffusion et la valorisation par les technologies de l'information et de la communication permettent ainsi de rendre accessible au plus grand nombre tout ou partie d'un objet patrimonial (Chantepeie, 2008). La création de documents 3D (Bilasco, 2007, p. 13) mis en réseau bénéficie de nouveaux moyens de médiation par le biais d'interfaces matérielles (smartphones, tablettes, salles d'immersion, etc.) et logicielles. Ces applications informatiques connaissent un essor important ces dernières années grâce à l'introduction de moteurs de jeux pour la visualisation et l'exploitation de documents 3D (Pauwels et al., 2010 ; Boeykens, 2011). La capacité de ces moteurs favorise également la représentation en temps réel de vastes environnements, et ce, de manière photoréaliste, à l'image de Unity3D (Merlo et al., 2013) ou encore de CryENGINE⁹ qui a été utilisé sur le projet de reconstitution virtuelle et d'enrichissement en réalité augmentée de l'église abbatiale de Cluny (Landrieu et al., 2011). Ces outils se présentent comme la réponse la plus prometteuse (Bottino, Marti, 2010) pour la création du musée virtuel (Tsichritzis, Gibbs, 1991) qui « permet de transcender les modes traditionnels de communication et d'interaction avec le visiteur... ; il ne dispose pas de lieu ni d'espace réel, ses objets, ainsi que les informations connexes, pouvant être diffusés aux quatre coins du monde » (Schweibenz, 2004).

Ces mêmes technologies profitent au domaine de la recherche. Un modèle numérique est un « champ de visualisation et d'expérimentation à disposition de la recherche » (Madeleine, Fleury, 2011). Il peut être à la base ou venir enrichir un système d'information existant comme les SIG3D par exemple, de plus en plus utilisés dans le domaine de la préservation patrimoniale (Frischer, 2008 ; Centofanti et al., 2011). L'objectif est la mise en place d'un espace permettant le partage de données scientifiques résultant de collectes, d'analyses ou de simulations tel que le projet Kheops Renaissance (Dassault System, 2012) mettant en scène la théorie de l'architecte Jean-Pierre Houdin sur la construction des pyramides du plateau de Gizeh.

⁹ <http://mycryengine.com/>

1.1.a. Objectifs de la numérisation de maquettes

La numérisation du patrimoine culturel et tout particulièrement celui des plans-reliefs répond à plusieurs enjeux. Le premier que l'on peut citer est évidemment la constitution d'archives numériques de plans-reliefs. Ces maquettes ont une longue histoire et, comme nous le verrons par la suite, elle n'a pas été sans conséquence sur la collection. Des destructions de maquettes et des dégradations provoquées par des déménagements ou simplement par les effets du temps suffisent à justifier la création d'une documentation numérique de la collection par un relevé tridimensionnel précis des maquettes.

Les maquettes que l'on a évoquées font souvent partie de collections. Le nombre de maquettes, leurs dimensions propres et leur état de conservation sont de lourdes contraintes. L'accès à ces maquettes est un enjeu, aussi bien pour le public de musée que pour le chercheur.

« Représentation spectaculaire, la maquette de synthèse se révèle ainsi, à la fois pour l'architecte restaurateur qui peut simuler l'effet de ses travaux, ou pour l'historien qui veut tester ses hypothèses, un outil convaincant, mais c'est surtout – comme la maquette de cire ou de papier mâché – un moyen pédagogique de premier ordre pour convaincre de la qualité des travaux, pour expliquer les techniques de construction et les principes théoriques, pour enseigner l'histoire de l'édifice ou de l'architecture ou, plus simplement pour présenter une information touristique de haut niveau. »

(Saint-Aubin, 1992, p. 172)

Les propos de Jean-Paul Saint-Aubin demeurent encore justes. Les applications possibles peuvent être appréhendées selon le destinataire. Pour des chercheurs, le modèle virtuel peut servir d'interface pour l'accès et l'échange de données multimédias patrimoniales. Cela peut être également un environnement pour la simulation d'illumination, restitutions archéologiques, comportement structural, etc. (Blaise et al., 2013). Pour le grand public, la valorisation de la maquette par la création d'un modèle numérique sous la forme de représentations virtuelles fixes, animées ou interactives, par le biais des jeux vidéos notamment (Mortara et al., 2013), peut agir comme un activateur de curiosité. Le modèle virtuel ne se substitue pas à la maquette (Madeleine, Fleury, 2011), mais permet de la mettre en relation – en réseau – avec d'autres collections, d'autres bases de données.

La numérisation de maquettes soulève également un enjeu technique. Elle interroge les capacités des systèmes d'acquisition actuels à effectuer des relevés tridimensionnels d'artefacts complexes, à la fois de grandes dimensions, mais d'un niveau de détail très élevé (El-Hakim et al., 2002). Cet aspect est d'autant plus crucial pour les projets dont l'objet d'étude est l'objet de communication, le médium de représentation (ici la maquette) et non pas l'objet représenté (la ville). Car à la différence du dernier où est effectué une restitution ou une évocation virtuelle (la fidélité à la maquette n'est pas l'objectif), le projet visant à la création d'une réplique virtuelle de maquette doit être fidèle à l'objet et ne peut pas notamment s'astreindre de l'échelle de représentation aussi bien dans la phase de relevé que dans celle de l'exploitation du modèle.

I.3. Conclusion sur les maquettes et leur pouvoir de séduction

Les maquettes ont un effet fascinant sur celui qui les observe. Cela s'explique par les caractéristiques uniques de ce moyen de représentation. Certes, les maquettes sont des représentations en trois dimensions de la réalité, mais c'est surtout le niveau de détails atteint par rapport à une petite échelle qui favorise le « renversement du procès de connaissances » (Lévi-Strauss, 1962, p. 44). Alors que pour comprendre un objet réel dans son entier on l'observe depuis ses parties en le fractionnant pour assimiler progressivement la complexité de la totalité, les maquettes renversent ce processus. La réduction de la géométrie, la simplification de propriétés rendent l'objet « moins redoutable », ce qui permet immédiatement son appréhension dans sa totalité puisque « dans le modèle réduit la connaissance du tout précède celles des parties ». Enfin, Lévi-Strauss rappelle également la nature artificielle du modèle réduit qui permet de comprendre comment il a été réalisé et de susciter ainsi chez le spectateur le sentiment d'en être le créateur.

Ce pouvoir de fascination s'illustre avec la mode récente du *Tilt-Shift* ou effet de bascule qui permet de simuler un effet de miniaturisation en photographie (Figure 3). Contournant les déformations de perspective et réduisant exagérément la profondeur de champ, il est alors possible de donner une impression de miniature à une scène photographiée ou filmée.



Figure 3. Photographie d'un bâtiment abritant des turbines au pied du barrage de Caban Coch, Pays de Galle.
Photo : Frosted Peppercorn / flickr.com

Cette mode met ainsi en avant un des enjeux auxquels nous devons faire face lors de la numérisation des maquettes : la profondeur de champ est un paramètre extrêmement délicat pour la macrophotographie et par extensions pour la photogrammétrie appliquée à des objets d'une grande richesse de détail comme les maquettes (Gallo et al., en presse). Néanmoins, la photogrammétrie n'est qu'une technique parmi d'autres. Le chapitre suivant présente les principaux moyens de numérisation rencontrés dans le champ du patrimoine. On s'attache notamment à montrer les avancées significatives des techniques de photogrammétrie.

Chapitre II. Les approches pour le relevé tridimensionnel du patrimoine architectural

L'acquisition ou relevé tridimensionnel est la première étape du processus visant à la modélisation géométrique virtuelle d'un objet réel. Ce chapitre présente les principales techniques d'acquisition tridimensionnelle tout en s'attachant à montrer les récentes avancées des techniques de photogrammétrie. Ces dernières années ont vu par ailleurs se multiplier le nombre des acteurs et des produits dans le domaine du relevé tridimensionnel et de la sauvegarde du patrimoine. D'un côté, les prix des technologies décroissent rapidement, de l'autre il est difficile, notamment pour ceux qui ne sont pas spécialistes, de choisir le bon outil par manque de standard au niveau de la terminologie, des caractéristiques, mais surtout par l'absence d'analyse comparative de performance (Remondino, 2011).

Afin de restreindre le corpus de technologies étudiées aux plus pertinentes, seuls seront présentés les instruments de mesure ou plateformes permettant d'effectuer des mesures absolues et l'enregistrement de points définis par des triplets de coordonnées. On exclut ainsi tous les instruments de mesure de distance (pied à coulisse, micromètre, etc.) souvent inclus dans la classification des capteurs 3D, mais aussi les systèmes de positionnement par satellites ou en anglais GNSS (*Global Navigation Satellite System*), capables eux aussi d'enregistrer des coordonnées avec des précisions non suffisantes pour la numérisation d'objets patrimoniaux (Figure 4).

Parmi les systèmes d'acquisition tridimensionnelle, on distingue déjà les méthodes nécessitant un contact avec l'objet étudié de celles qui s'en passent. Une MMT ou Machine à Mesurer Tridimensionnelle se compose d'une structure de déplacement, d'un système de palpation et d'un ordinateur pour la collecte des informations. Le palpeur (ou sonde) a longtemps été mécanique et nécessitait donc de toucher physiquement l'objet pour enregistrer la position du point de contact. L'utilisation de sondes optiques tend à se généraliser grâce à la précision qu'elles atteignent (Karrer, 2005). La plupart de ces machines sont articulées jusqu'à six degrés de liberté ce qui permet de déplacer la sonde dans les moindres anfractuosités. Même si elles peuvent être utilisées sur des objets de grandes dimensions – de la taille d'une voiture par exemple – et avec grande précision, le temps requis pour effectuer l'acquisition limite l'utilisation de tels systèmes. De plus, ces instruments ne peuvent être utilisés qu'en dehors du champ patrimonial, sur des objets dont la valeur historique et la fragilité n'interdisent pas le contact avec le sujet de l'étude.

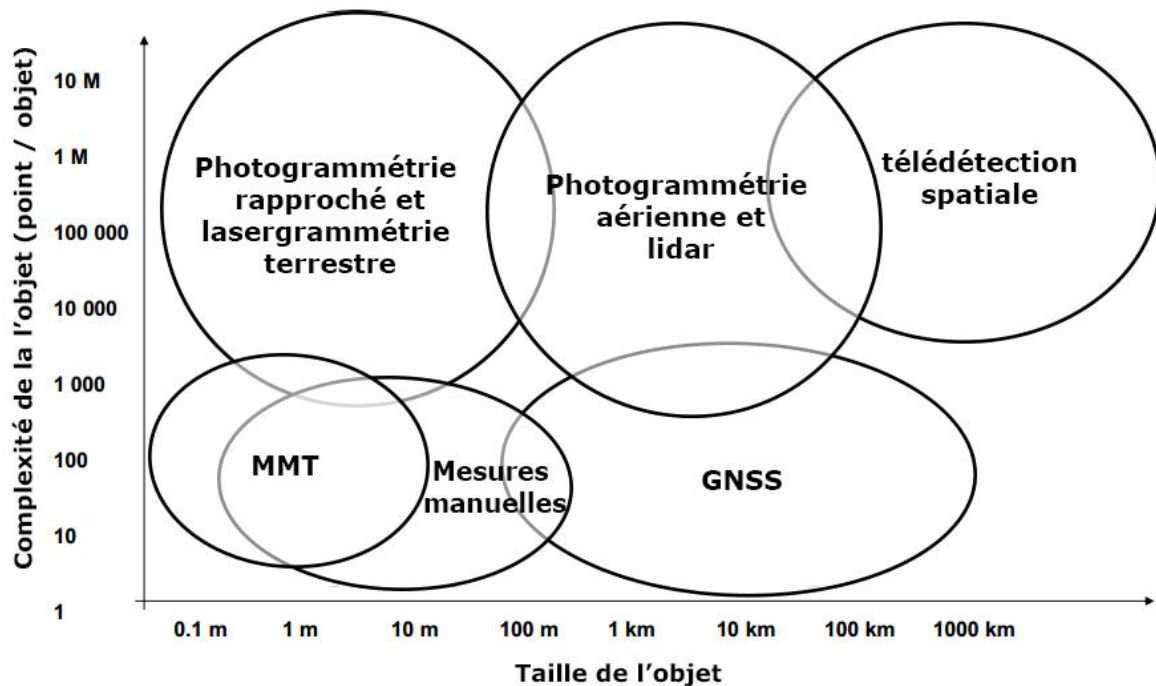


Figure 4. Comparaison des techniques d'enregistrement de données 3D en fonction de la taille de l'objet étudié et de sa complexité géométrique (point/objet).
D'après: Remondino, 2013

Dans le chapitre II.1, les techniques sans contact sont présentées et dissociées en techniques actives et passives. Restreintes au domaine patrimonial, les techniques actives et passives sont ensuite étudiées plus en détail dans les chapitres II.2 et II.3 respectivement. Le chapitre II.4 permet de présenter quelques-uns des facteurs et des critères à prendre en compte pour déterminer la meilleure technique (ou combinaison de techniques) pour la conduite de projet de numérisation d'objets à valeur patrimoniale.

II.1. Les techniques d'acquisition actives et passives

Parmi les techniques d'acquisition tridimensionnelle sans contact, on distingue généralement celles à acquisition passive de celles à acquisition active (Figure 5). Lorsqu'il est actif, le système utilisé émet un rayonnement, dont la position, ou la réflexion permet de déterminer des coordonnées x, y et z. L'acquisition est passive lorsqu'on obtient les informations tridimensionnelles par l'étude du rayonnement ambiant naturel, c'est-à-dire de la lumière perçue, comme c'est le cas en analyse d'images en photogrammétrie où l'on utilise des photographies et des algorithmes de corrélations pour définir les coordonnées de points.

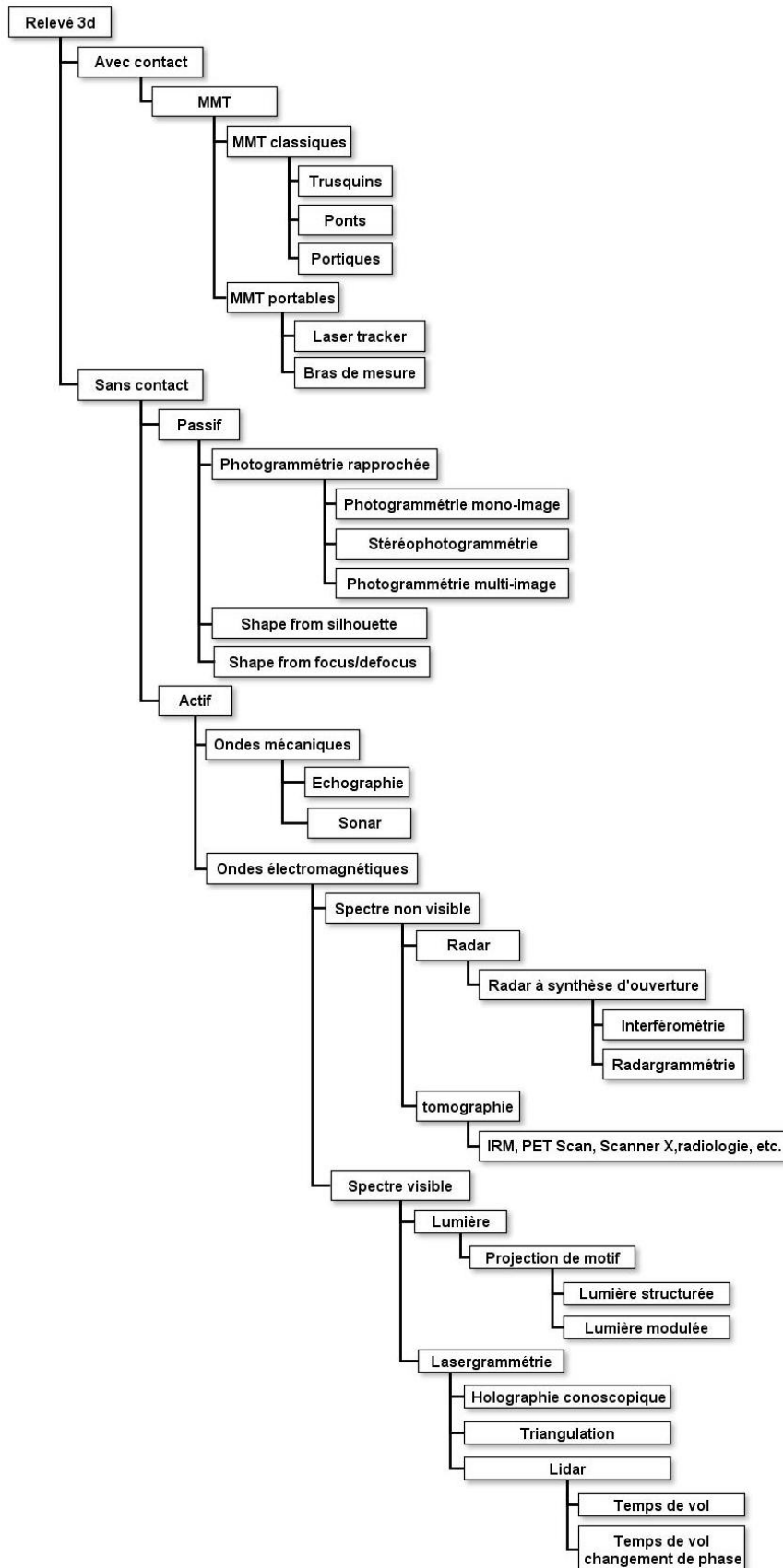


Figure 5. Classification des principales techniques d'acquisition tridimensionnelle. Dans ce chapitre, seules les techniques sans contact sont abordées et plus particulièrement la photogrammétrie rapprochée pour les techniques passives et la lasergrammétrie pour les techniques actives.

Les techniques actives utilisent notamment les ondes électromagnétiques visibles (Figure 6, spectre visible : de 770 à 400 THz) pour l'obtention de relevés tridimensionnels, mais l'utilisation d'ondes électromagnétiques en dehors de ce spectre permet également la création de représentations 3D comme c'est le cas notamment en imagerie médicale avec la tomographie 3D (Lanman, Taubin, 2009). Cette dernière est proche de l'analyse d'images nécessaire avec les technologies passives, car les ondes émises en tomographie traversent l'objet étudié pour en donner une image bidimensionnelle : une coupe. Seul un traitement appliqué à ces coupes permet la reconstruction en 3D de l'objet étudié.

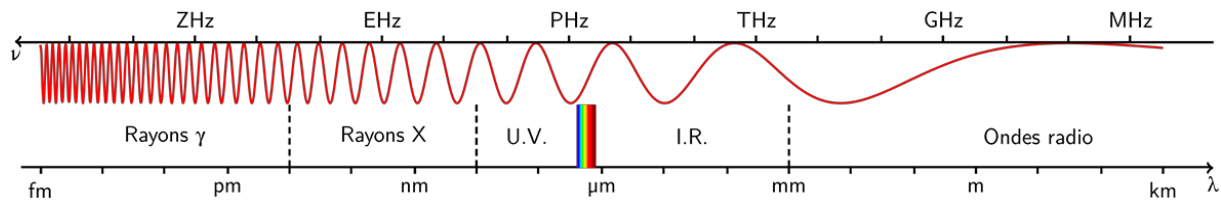


Figure 6. Principaux domaines du spectre électromagnétique (rayons γ , X, ultraviolets, lumière, infrarouges, et ondes radio) avec les fréquences et longueurs d'onde correspondantes.
D'après Benjamin ABEL, Wikipedia (Creative Commons), 2012.

La détection et estimation de la distance par ondes radio ou radar (*radio detection and ranging*) et la détection et estimation de la distance par ondes mécanique ou sonars (*sound navigation and ranging*) sont deux autres techniques pour obtenir des données tridimensionnelles. L'utilisation de ces technologies répond à des contraintes précises : les sonars latéraux sont notamment utilisés en milieux sous marin où les ondes électromagnétiques du spectre visible sont impuissantes du fait de l'opacité de l'environnement. Pour la même raison, les radars, et plus particulièrement les radars à synthèse d'ouverture peuvent être utilisés pour la création de modèles numériques de terrain, car ils sont capables d'enregistrer des données sur les surfaces recouvertes de neige ou d'eau et de passer à travers les couvertures nuageuses ou végétales, etc. (Fayard, 2010). De la même manière, en raison des difficultés pour les capteurs laser traditionnels à numériser des objets dont la surface est spéculaire, des méthodes utilisant le rayonnement infrarouge ont été développées (Bajard, 2012).

Le domaine de l'acquisition tridimensionnelle appliquée au patrimoine architectural privilégie principalement la lasergrammétrie (II.2) et la photogrammétrie (II.3) ou des méthodes dérivées dans lesquelles est étudiée la variation entre plusieurs clichés des ombres propres, des ombres portées, de la mise au point, etc. (Pavlidis et al., 2006).

II.2. La lasergrammétrie et la projection de lumière

D'un point de vue étymologique, la lasergrammétrie est la mesure par le laser, c'est-à-dire par l'émission de lumière cohérente. Également appelée scan 3D ou laser, la lasergrammétrie est une discipline où la prise de mesures tridimensionnelles est basée sur la capacité de réflexion des objets étudiés. Une session de numérisation laser, quel que soit le dispositif ou la méthode utilisée, résulte en l'acquisition d'un grand nombre de points suivant un motif régulier appelé aussi nuage de points.

« Le balayage laser terrestre est une technique d'acquisition rapide et automatique de données tridimensionnelles utilisant la lumière laser pour mesurer directement, sans contact avec l'objet et selon une trame régulière, les coordonnées 3D des points sur des surfaces depuis une position terrestre. »

(Landes, Grussenmeyer, 2011, p. 38)

Outre la lasergrammétrie, dont sont présentées les deux principales techniques au chapitre II.2.a, il existe également des techniques d'acquisition basées sur l'effet de moiré où l'on observe comment se déforment des motifs de lumière sur l'objet étudié (projection de lumière structurée ou modulée). Encore utilisées de manière limitée dans le domaine architectural, ces techniques à projection de lumière sont pourtant supérieures à la lasergrammétrie en matière de précision sur de courtes distances (chapitre II.2.b). Si les projets de numérisation dans le domaine patrimonial se sont multipliés ces dernières années, c'est grâce à l'évolution de ces outils actifs. À l'origine utilisés dans les industries vidéoludiques, cinématographiques ou l'ingénierie, ces outils ne pouvaient répondre ni à l'ensemble des caractéristiques, ni aux objectifs du patrimoine numérique. En particulier, leur incapacité à enregistrer des données photométriques sur l'objet étudié ou les problèmes inhérents à l'acquisition des arêtes vives constitue encore des freins à l'utilisation de techniques actives (Wachowiak, Karas, 2009). Enfin, parmi les dernières évolutions des techniques actives, plusieurs kits dont il est possible de faire l'achat sur internet à des coûts réduits sont présentés dans le chapitre II.2.c.

II.2.a. La lasergrammétrie

En matière d'acquisition laser pour l'architecture, deux techniques coexistent : le lidar terrestre, qui utilise le temps de vol d'une impulsion laser afin de déterminer une distance (II.2.a.a) et la triangulation, une technique dans laquelle un capteur photographique observe la position du laser, émis par le dispositif de numérisation sur l'objet (II.2.a.b).

II.2.a.a. Acquisition tridimensionnelle par mesure du temps de vol

L'acquisition laser terrestre par lidar, également appelée à temps de vol (ou TOF pour *Time Of Flight*) ou encore télémétrie laser est adaptée aux objets de dimensions importantes, car elle permet de couvrir des distances plus grandes que les lasers à triangulation dont la portée ne dépasse pas quelques mètres, mais qui s'avèrent supérieurs pour l'acquisition d'éléments de petites dimensions (Guidi et al., 2005). Cela s'explique simplement par le fonctionnement des capteurs. Un capteur à temps de vol calcule la distance parcourue par une impulsion pour effectuer l'aller-retour entre le capteur et l'objet. L'instrument ne pourra émettre une autre impulsion qu'après réception de l'écho de l'impulsion précédente. La distance est calculée selon l'équation 1 (Landes, Grussenmeyer, 2011).

Équation 1

$$D = C T / 2$$

Où : D = la distance totale parcourue par le laser
C = la vitesse de la lumière (299 792 458 m/s)
T = le temps de vol

Le capteur à décalage, différence ou changement, de phase – également appelé abusivement laser radar – est une technique proche du capteur à temps de vol présentée précédemment (Piatti et al., 2013). La puissance du rayon laser, émis de manière continue, est modulée de manière sinusoïdale (Kemeny, Turner, 2008). Il est réfléchi puis comparé au laser émis afin de déterminer le changement de phase. Les techniques basées sur le changement de phase sont capables d'enregistrer un très grand nombre de points, mais disposent d'une portée plus réduite que les dispositifs à temps de vol classiques. Le temps de vol peut alors être déterminé selon l'équation 2, avant de calculer la distance selon l'équation 1 avec la valeur T obtenue (Landes, Grussenmeyer, 2011).

Équation 2

$$T = \Delta_p / 2 \pi M$$

Où : T = le temps de vol
 Δ_p = la différence de phase
M = la modulation de fréquence

L'imprécision de ces méthodes à courte distance de l'objet étudié est un facteur à prendre en compte puisque l'exactitude du calcul dépend de la mesure du temps de retour. Sachant que la lumière parcourt près de 3×10^{10} cm/s, effectuer des mesures des distances relativement faibles nécessite une grande précision de l'horloge équipant l'appareil de mesure.

II.2.a.b. Acquisition tridimensionnelle par triangulation

Pour des numérisations précises d'objets de faibles dimensions, on préférera les instruments fonctionnant par triangulation. La numérisation par triangulation ne dépend pas d'un calcul dans lequel la vitesse de la lumière intervient puisqu'elle repose sur l'observation, par un système optique décalé, d'un point ou d'une bande de lumière émise par laser. Les caractéristiques du faisceau sont connues, comme les positions de l'émetteur du laser et du capteur photographique ce qui permet, par trigonométrie, de trouver la position du point émis sur l'objet étudié (Landes, Grussenmeyer, 2011) selon l'équation 3.

Certains dispositifs par triangulation sont fixes et l'objet étudié doit pivoter sur une table pour être numérisé, d'autres sont montés sur des bras qui peuvent être robotisés. La précision moyenne des capteurs laser par triangulation est de 0,1 mm à une distance de l'objet étudié de moins d'un mètre.

Équation 3

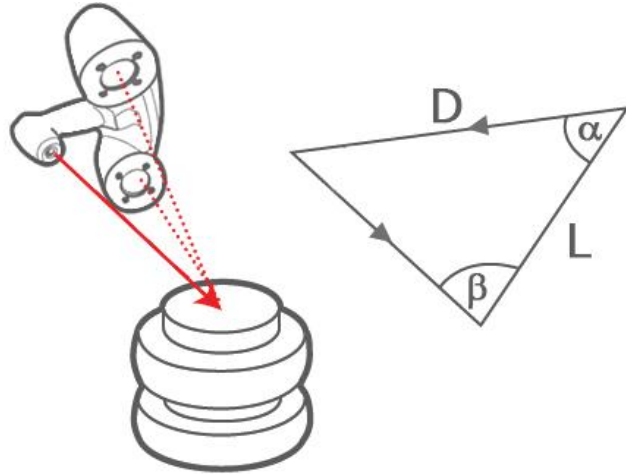
$$D = L \times \sin \beta / \sin(\alpha + \beta)$$

Où : D = la distance entre l'émetteur et la projection du laser sur l'objet

L = la distance séparant l'émetteur du laser du récepteur

α = l'angle entre le rayon émis et l'axe émetteur-récepteur

β = l'angle entre le rayon réfléchi et l'axe émetteur-récepteur



II.2.b. Projection de motifs

S'appuyant aussi sur la triangulation, ces dispositifs projettent des motifs prédéfinis sur une surface qui est observée par un ou deux capteurs photographiques. La forme projetée apparaît déformée depuis les angles de vues des capteurs. Ce sont ces déformations qui sont ensuite analysées pour déterminer la volumétrie de la surface de l'objet étudié. C'est une technique notamment utilisée pour la numérisation d'objets patrimoniaux de tailles réduites.

Ils sont en général plus précis ainsi que moins sujets à générer des données bruitées (Fuchs, 2006). Néanmoins, ces dispositifs sont plus encombrants que les capteurs laser à triangulation et plus sensibles à l'environnement (problème de luminosité) et aux matériaux de surface des objets relevés. Leur portée est également plus limitée (quelques mètres). Les recherches actuelles sur cette technologie sont concentrées sur la capacité des dispositifs à capturer en temps réel les données tridimensionnelles (Koutsoudis, Vidmar, Arnaoutoglou, et al., 2013).

Pour résoudre le problème de la sensibilité à la lumière ambiante, des capteurs à projection de motifs peuvent restreindre le spectre lumineux utilisé pour corriger un biais dans l'éclairage de la scène. Les motifs projetés peuvent même appartenir à des rayonnements en dehors du spectre visible comme dans le cas des infrarouges pour la Kinect de Microsoft (Remondino, 2011).

II.2.c. Démocratisation des techniques actives

Les techniques d'acquisition active comme la lasergrammétrie et la projection de lumière répondent à des projets différents du fait de leurs caractéristiques que celles-ci soient matérielles (poids et dimensions des appareils), mais surtout méthodologiques (triangulation ou temps de vol, vitesse, précision et portée). Le Tableau 1 met en avant cette observation en comparant les principales caractéristiques des techniques de numérisation actives.

Depuis 2011 et l'arrivée de kits comme DAVID Lasercanner (DAVID Vision Systems, 2013), NextEngine 3D (NextEnginge, 2013) ou encore Artec Studio + Kinect (Artec Group Company, 2013), il est possible de numériser des objets en 3D pour un budget ne dépassant pas quelques centaines d'euros. Le nombre de capteurs 3D laser à bas prix n'a cessé de croître et leur apport pour la numérisation du patrimoine peut être pertinent dans des conditions précises (Alby et al., 2009). Même s'ils se destinent encore à une utilisation non professionnelle, ces techniques bénéficient d'une communauté active d'utilisateurs formant de véritables équipes de recherche et développement (Winkelbach, 2011).

Depuis l'arrivée des capteurs laser au cours du dernier quart du XXe siècle et la forte concurrence commerciale dans les années 90, la lasergrammétrie a évolué tant du point de vue du matériel que commercial. Malgré cette démocratisation, les techniques actives restent relativement onéreuses par rapport aux techniques passives comme la photogrammétrie. Mais la rapidité d'acquisition (Tableau 1) des techniques actives leur a permis de s'installer durablement dans le paysage de la numérisation patrimoniale. Or, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, les récentes évolutions techniques en photogrammétrie (photogrammétrie numérique, rapprochement des communautés de chercheurs) permettent à cette technique ancienne d'être à nouveau une alternative sérieuse à la lasergrammétrie.

Dispositif de numérisation	Utilisation	Vitesse	Précision (mm)	Portée (m)
Triangulation (laser)	- Numérisation de petits objets <i>in situ</i> ou <i>ex situ</i> - Création de répliques	20 000 – 500 000 points/seconde	0,028 – 0,275	0,1 – 2
Triangulation (lumière)	- Numérisation de petits objets <i>in situ</i> ou <i>ex situ</i> - Création de répliques	1 – 6M points/1 – 10 secondes	0,005 – 0,12	0,3 – 1,5
Temps de vol (impulsion)	- Relevé extérieur - Travaux topographiques	10 000 – 100 000 points/seconde	3 – 8	0,3 – 2000
Temps de vol (comparaison de phase)	1. Relevé intérieur 2. Chantier à courte portée	2M points/seconde	0,6 – 3	0,2 – 120
Aéroporté	Cartographie	20 000 – 150 000	50	100 – 3 500
Kinect	Jeux vidéo à l'origine	n.a.	1,5 – 50	0,5 – 3,5

Tableau 1. Techniques de numérisation laser utilisée dans le patrimoine architectural.
D'après Mills, Andrews, 2011 ; Remondino, 2011 ; Landes, Grussenmeyer, 2011

II.3. La Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique dont les fondements remontent à plusieurs siècles. Assemblage du grec *photos*, « lumière », de *gramma*, « lettre » et de *metron*, « mesure » (CNRTL, 2012) : « La photogrammétrie est la science ou la technique permettant d'obtenir des informations fiables sur l'espace naturel ou sur des objets physiques par l'enregistrement, la mesure et l'interprétation d'images photographiques ou produites par rayonnements électromagnétiques ou autres phénomènes » (American Society of Photogrammetry, 1980).

Utilisée depuis longtemps dans le domaine de la cartographie, mais également dans une moindre mesure, dans l'architecture, la photogrammétrie est devenue au cours des dernières années une technique de numérisation tridimensionnelle équivalente en résultat à la lasergrammétrie. On peut distinguer la photogrammétrie aérienne et la photogrammétrie rapprochée : discipline où la photogrammétrie architecturale connaît un regain d'intérêt grâce à l'introduction du numérique à partir des années 1990. La photogrammétrie architecturale peut être définie comme « l'application des méthodes photogrammétriques aux relevés des monuments et aux travaux d'architecture » (INSA-Strasbourg, 2013).

Les techniques de photogrammétrie rapprochée peuvent être classées en fonction du nombre de clichés photographiques à la base du processus de restitution photogrammétrique (Grussenmeyer et al., 2002). Il peut s'agir :

- D'une image ou mono-image. La mise en place de cette approche permet le redressement d'images pour l'obtention d'ortho-image par exemple ;
- D'un couple d'images ou stéréoscopie (*stereographic processing*). La stéréophotogrammétrie numérique est la dernière évolution de la stéréophotogrammétrie (Alby, 2006). L'apport du numérique se traduit par des performances accrues ainsi que des prix abordables. Dans cette approche, les couples de stéréophotos ont des axes de prises de vues parallèles ;
- D'un lot d'images ou multi-images (*bundle restitution*). La photogrammétrie multi-images est une approche accessible, car les prises de vues répondent à des contraintes beaucoup moins rigoureuses : les photos peuvent être convergentes par exemple.

Après cette présentation des principales caractéristiques de la photogrammétrie, les parties suivantes nous permettent d'aborder plus spécifiquement les enjeux actuels de la photogrammétrie (II.3.a), avant de poursuivre avec la partie II.3.b, dans laquelle sont abordées les évolutions récentes de cette technique d'acquisition.

II.3.a. Enjeux actuels

En photogrammétrie, il est nécessaire d'effectuer des calculs préalables au relevé tridimensionnel. La détermination des caractéristiques intrinsèques de l'appareil photographique et l'orientation des photographies les unes par rapport aux autres forment ce que l'on appelle les paramètres d'orientation externe et

interne. L'orientation interne, calibration ou étalonnage de l'objectif de l'appareil photographique, permet de déterminer les paramètres de distance focale ou principale de l'objectif, ainsi que les coordonnées du point principal, les paramètres de distorsion, etc. L'orientation externe a elle pour but la détermination de la position et l'orientation des photographies dans un référentiel commun, grâce à des points de liaisons présents d'un cliché à l'autre.

Outre ces deux processus, étapes initiales de tout relevé photogrammétrique, mais aussi objets de recherche au niveau de leur automatisation, de nombreuses études se concentrent sur la création automatique de nuages de points denses par corrélation d'images. Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, la vision par ordinateur, discipline *a priori* éloignée de la photogrammétrie, a permis récemment d'apporter des éléments de réponse à ces enjeux.

II.3.b. Évolutions récentes de la photogrammétrie

En plus des progrès en matière de puissance de calculs, c'est grâce au rapprochement très récent des communautés de photogrammétrie et de vision par ordinateur que les recherches en acquisition tridimensionnelle ont le plus progressé. Ces deux communautés partagent un objectif général commun : la « recherche de mesure 3D à partir d'images » (Kalantari, Kasser, 2008). Néanmoins, dans le cadre applicatif de la vision par ordinateur, « la contrainte de traitement en temps réel supplante celle de l'exactitude », une exigence qui est précisément recherchée en photogrammétrie (Hullo, 2010). Des algorithmes hérités de la recherche en vision par ordinateur tels que SfM (*Structure from Motion*) permettent dorénavant l'autocalibration et l'orientation relative des photographies tandis que d'autres algorithmes comme DMVR (*Dense Multi-View 3D Reconstruction*) permettent de générer des nuages de points par corrélation épipolaire dense (Ripoche, 2012 ; Trochon, 2012). La technique employée ne se limite pas à la stéréoscopie comme avec PhotoModeler Scanner. Des logiciels multi-images automatiques libres d'accès existent (Bundler/PMVS, Insight3D et VisualSFM), sous la forme de services web qui assurent les calculs d'orientation et de corrélation (Arc3D¹⁰, Photosynth¹¹, 123D Catch¹², ReCap Photo¹³, Hypr3D¹⁴ ou Digiteyer¹⁵ pour smartphones), d'applications à bas prix (Agisoft PhotoScan¹⁶) ou d'applications téléchargeables (MicMac et Apero de l'IGN) (Remondino et al., 2012).

De nombreuses expérimentations ont été menées pour déterminer la précision des méthodes SfM/DMVR. Citons par exemple les études réalisées avec Photoscan sur différents cas d'étude, dont une idole féminine typique de l'art cycladique (Figure 7) qui se caractérise par un matériau monochrome (obsidienne ou marbre) et une géométrie extrêmement élémentaire (Koutsoudis, Vidmar, Arnaouto-

¹⁰ <http://www.arc3d.be>

¹¹ <http://photosynth.net>

¹² <http://www.123dapp.com/catch>

¹³ <http://recap.autodesk.com>

¹⁴ <http://www.hypr3d.com>

¹⁵ <http://www.digiteyer.com>

¹⁶ <http://www.agisoft.ru>

glou, 2013) et un monument ottoman du XV^e siècle (Koutsoudis et al., 2012). Dans le premier cas, malgré les problèmes des techniques SfM/DMVR en matière d'acquisition de surfaces monochromes et, qui plus est, dépourvues d'éléments visuels forts comme les statues cycladiques, les données acquises par Photoscan sont satisfaisantes. Peu de variations sont en effet notées entre les relevés effectués par photogrammétrie et par capteur laser. Dans le second cas, des distances entre des points spécifiques du monument ont été comparées. Les relevés Photoscan sont confrontés à des relevés effectués par capteur laser, mais aussi réalisés directement sur le bâtiment. Les résultats sont de qualité, mais aussi relatif à la puissance matérielle et aux conditions d'éclairage de l'objet étudié.

Ces expérimentations démontrent les bons résultats de ces nouvelles techniques (Figure 7). Les résultats sont comparables à ceux obtenus par d'autres techniques reconnues malgré certaines contraintes (lumière ambiante, matérielle, caractéristiques des matériaux et géométries de l'objet étudié). Le constat est le même lorsque l'on compare d'autres programmes comme Photosynth à une solution éprouvée comme PhotoModeler Scanner. Le coût, le protocole d'acquisition et l'automatisation des étapes d'orientations permettent un gain non négligeable par rapport à Photomodeler Scanner (Ripoche, 2012). Bundler/PMVS a également été comparé à un capteur laser et les résultats annoncés par Skarlatos (2012) montrent que, sur des objets de faibles et moyennes dimensions (de quelques décimètres à quelques dizaines de mètres), les relevés photogrammétriques sont supérieurs à ceux de la lasergrammétrie. Lorsque l'on considère, en plus des données géométriques du relevé, les considérations pécuniaires, chromatiques et de mise en œuvre, les techniques SfM/DMVR s'avèrent plus intéressantes (Zeroual et al., 2011 ; Kersten, Lindstaedt, 2012 ; La Mantia, Lanfranchi, 2013 ; Manferdini, Galassi, 2013).

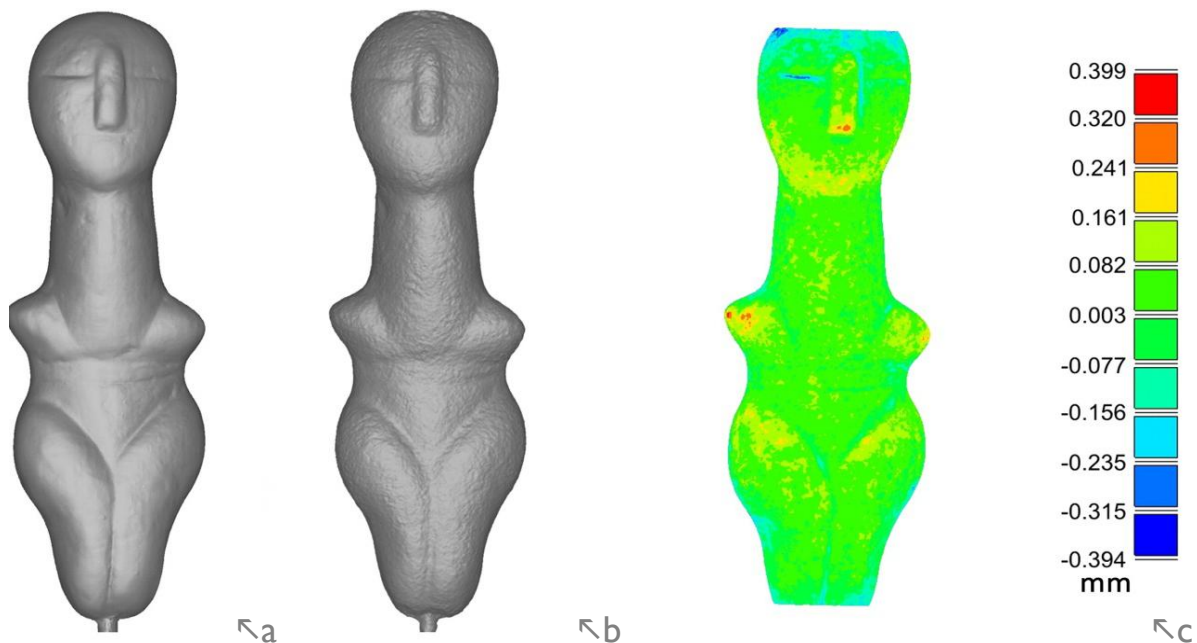


Figure 7. Même si par observation directe le maillage issu de la photogrammétrie apparaît davantage bruité (b) que le maillage issu du capteur laser (a), la comparaison des maillages (à droite) ne présente pas d'écart majeur.

D'après : Koutsoudis, Vidmar, Arnaoutoglou, 2013

II.4. Choix d'une méthode pour la numérisation du patrimoine

Ces quinze dernières années, l'avancée technologique rapide des méthodes actives (lasergrammétrie en particulier) a pu laisser croire que ces techniques de numérisation pourraient supplanter la photogrammétrie rapprochée. Les publications d'études interrogeant les atouts et les défauts des techniques actives et passives sont nombreuses et des comparaisons sont faites régulièrement pour faire face à l'arrivée sur le marché de nouveaux dispositifs et nouvelles techniques (Skarlatos, Kiparissi, 2012).

Certes, les techniques actives sont maintenant bien implantées dans le domaine de la numérisation patrimoniale du fait de leur simplicité d'utilisation et de l'extrême précision des relevés générés qui sont visibles immédiatement. Ainsi, la plupart des projets de numérisation de maquettes anciennes ont recours à des capteurs laser ou à projection de lumière (Figure 8). Mais les récentes avancées en photogrammétrie, telles que l'automatisation des étapes de calibration et d'orientation, la baisse des coûts des matériels et logiciels par rapport aux dispositifs actifs en font une alternative sérieuse aux techniques actives. Et même si certains dispositifs actifs sont à même de fournir des données photométriques associées à la géométrie relevée, la qualité des textures n'est pas comparable à celle générée par photogrammétrie (Remondino, Menna, 2008).

Lorsque l'objet étudié n'est accessible que pendant un laps de temps réduit (dépose de statues pour une opération de restauration, exposition temporaire de plans-reliefs, etc.) la photogrammétrie permet, avec la prise de photographies, d'effectuer un relevé beaucoup plus rapidement que par lasergrammétrie. La numérisation par laser, à l'inverse, est toute désignée pour l'acquisition des formes fortement irrégulières telles que les reliefs, les rondes-bosses, etc. (Boehler et al., 2002).

Enfin, la photographie rapprochée bénéficie d'un nouvel atout avec les drones. La photogrammétrie aéroportée jusque-là réservée à des projets au budget conséquent se retrouve à la portée d'un nombre croissant d'utilisateurs avec l'arrivée sur le marché de drones civil bon marché comme l'eye3 (Sigler, 2012). Chaque technique ayant ses points forts, l'enjeu réside dans la détermination du processus menant au relevé numérique d'objets doit aujourd'hui répondre à des critères bien définis (Remondino, 2011 ; Koutsoudis, Vidmar, Arnaoutoglou, et al., 2013). La méthode et le choix du/des dispositif(s) de reconstruction dépendent essentiellement de trois facteurs :

1. de l'objet et de ses propriétés géométriques et de matériaux ;
2. de l'environnement de l'objet ;
3. des objectifs et des moyens du projet.

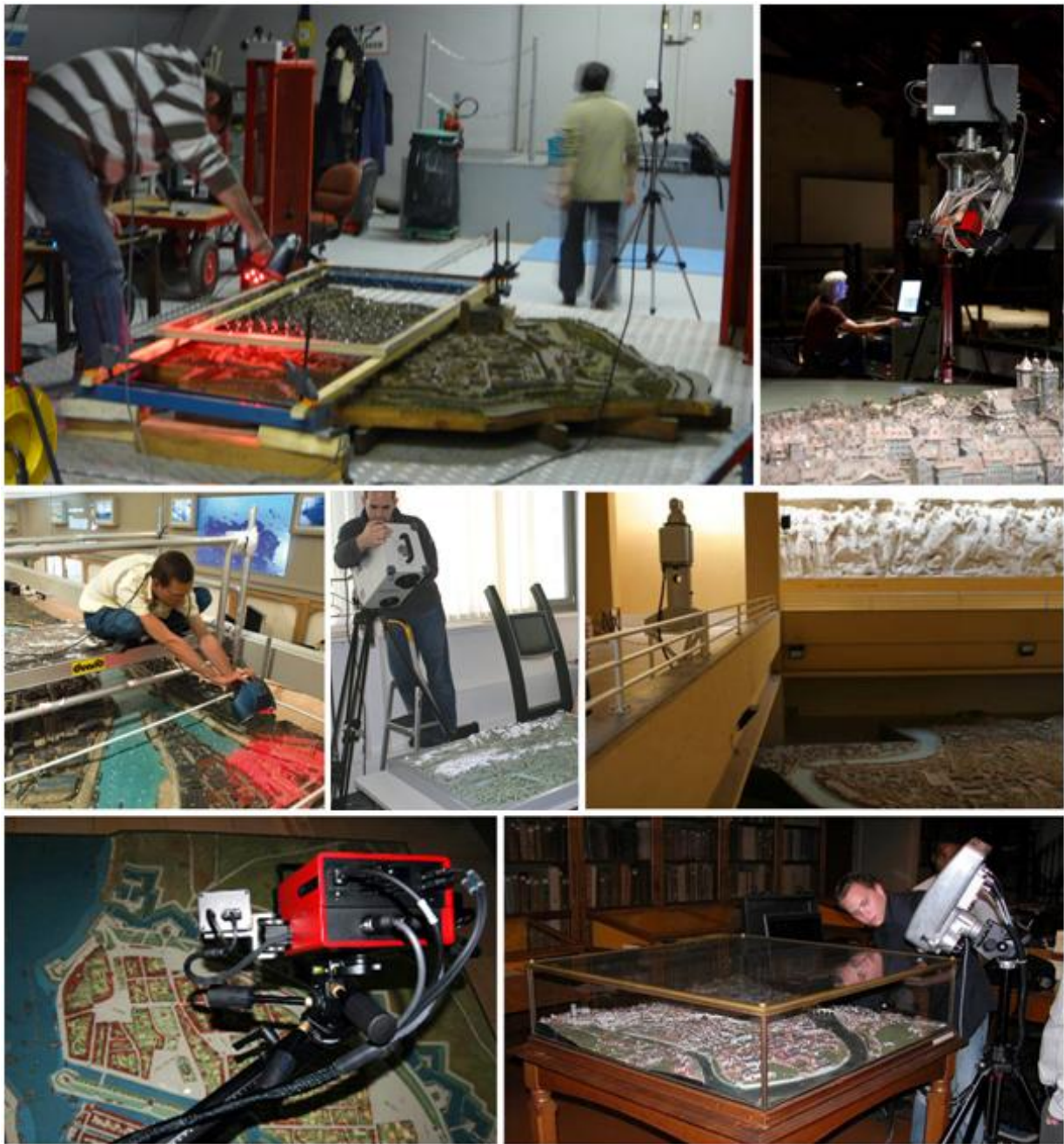


Figure 8. Quelques exemples de maquettes de villes et des instruments mis en œuvre pour leur numérisation :

- a. Plan-relief de Toul : capteur laser à triangulation EXAscan (Creaform) ;
 - b. *Relief Magnin* : capteur à lumière structurée Atos II (GOM mbH) ;
 - c. *La Maquette du Port de Nantes en 1900* : capteur laser à triangulation REVscan (Creaform) ;
 - d. Relief suisse : capteur à triangulation VI-900 (Minolta) ;
 - e. *Plastico di Roma antica* : capteur à comparaison phase LR200(Leica) ;
 - f. Plan-relief de Hambourg : capteur à lumière structurée Atos I (GOM mbH) ;
 - g. *La cité de Liège vers 1730* : capteur maison à lumière structurée.
- Photos : auteur (a), PRAM (b), Laroche et al., 2011 (c), Pearson et al., 2009 (d), Guidi et al., 2005 (e), Kersten et al., 2012 (f) et Billen et al., 2009 (g)

II.4.a. Propriétés géométriques et de matériaux de l'objet étudié

Le choix du dispositif de numérisation est fonction des propriétés optiques (couleur, réflectivité, etc.), mécaniques (rugosité p. ex.), etc. des matériaux de l'objet. Dans le cas de l'utilisation de techniques actives comme la lasergrammétrie, les irrégularités de la surface numérisée engendrent des variations dans les temps de retour du laser. Elles sont dues à une réflexion diffuse des ondes du faisceau laser par une surface présentant des irrégularités à l'échelle de la longueur d'onde (imperfections proches du micromètre). Une réflexion spéculaire peut aussi avoir lieu sur des surfaces ne présentant aucun défaut supérieur aux valeurs de la longueur d'onde du laser (Bajard et al., 2011). Des surfaces dont les albédos¹⁷ diffèrent peuvent également générer une variation de réflectivité qui va être source d'erreurs dans la prise de mesure.

La géométrie de l'objet peut générer des problèmes d'occlusion et de masque. Ce phénomène se produit lorsque des éléments dissimulent des parties de l'objet étudié. Comme à la limite d'objets ou en présence de trous dans ceux-ci, le faisceau peut alors ne pas être totalement réfléchi et/ou être invisible pour le dispositif récepteur. Ce phénomène se traduit par un défaut d'information (Figure 9, a) ou pire en des informations erronées (Figure 9, b).

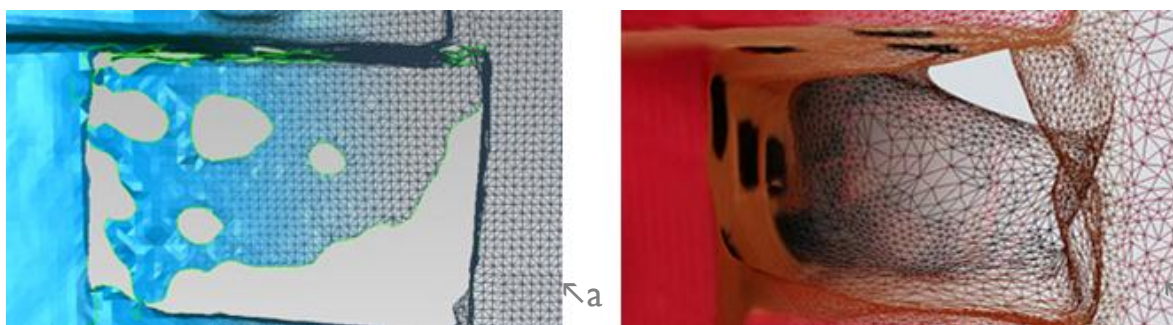


Figure 9. Comparaison des maillages obtenus par capteurs laser (a) et par photogrammétrie (b). À l'échelle de maquettes, les coeurs d'îlots provoquent des erreurs dans les relevés laser ou photogrammétrique assimilables à celles provoquées par la présence de trous dans l'objet d'étude.
D'après: Giraud et al., 2013

II.4.b. Environnement de l'objet

L'environnement de l'objet étudié est un facteur déterminant dans le choix de la méthode d'acquisition. Il est souvent impossible de déplacer les objets, soit à cause de leur fragilité, soit du fait de leurs dimensions. Les sessions de relevé tridimensionnel peuvent ainsi avoir lieu sur un site qui fait l'objet de recherche (site archéologique par exemple) ou un lieu d'exposition accueillant des touristes. Dans les deux cas, le matériel utilisé pour l'acquisition doit être léger et rapide et pour ne pas perturber l'activité touristique ou scientifique. La méthode d'acquisition doit être facile à mettre en œuvre afin de répondre au problème d'accessibilité des objets, à l'absence d'électricité, etc.

La température, la pression et l'humidité peuvent affecter l'indice de réfraction du milieu traversé par l'onde émise par un dispositif actif tandis que du bruit, provoqué par des vibrations extérieures, peut

¹⁷ L'albédo est le rapport entre la quantité de lumière que reçoit un corps et celle qu'il réfléchit ou diffuse

apparaître dans les données relevées par des méthodes actives, mais aussi passives. Enfin, la luminosité peut perturber le relevé tridimensionnel en augmentant les risques de présences de longueurs d'onde proches de celles du rayon émis comme c'est le cas avec les dispositifs à projection de motifs lumineux.

II.4.c. Objectifs et moyens du projet

Dans le domaine patrimonial, il n'est pas rare d'être confronté à des objets de grandes dimensions, mais présentant une grande richesse de détails. Obtenir des nuages de points toujours plus denses n'est pas l'enjeu des relevés tridimensionnels (Figure 10). Numériser à une résolution importante peut en effet nuire au projet par l'excès d'informations générées, une information pas toujours pertinente. Selon l'application dont il sera fait des données relevées, maintenir une précision élevée peut ne pas être une nécessité sur l'objet complet ou sur certaines de ses parties. L'exemple des maquettes est révélateur puisque plusieurs projets n'ont pour ambition qu'une exploitation sur Google Earth, une plateforme incapable de gérer des modèles géométriques détaillés. Dans cette situation, la phase d'acquisition n'a pas besoin d'être précise au point de rendre compte des débords de toiture présents sur les bâtiments représentés en maquettes. De même, entre les parties urbaines et les parties rurales, la densité et la richesse des éléments représentés sur les maquettes sont inégales. Il n'est pas essentiel d'avoir une résolution aussi élevée sur les parties rurales que sur les parties urbaines.

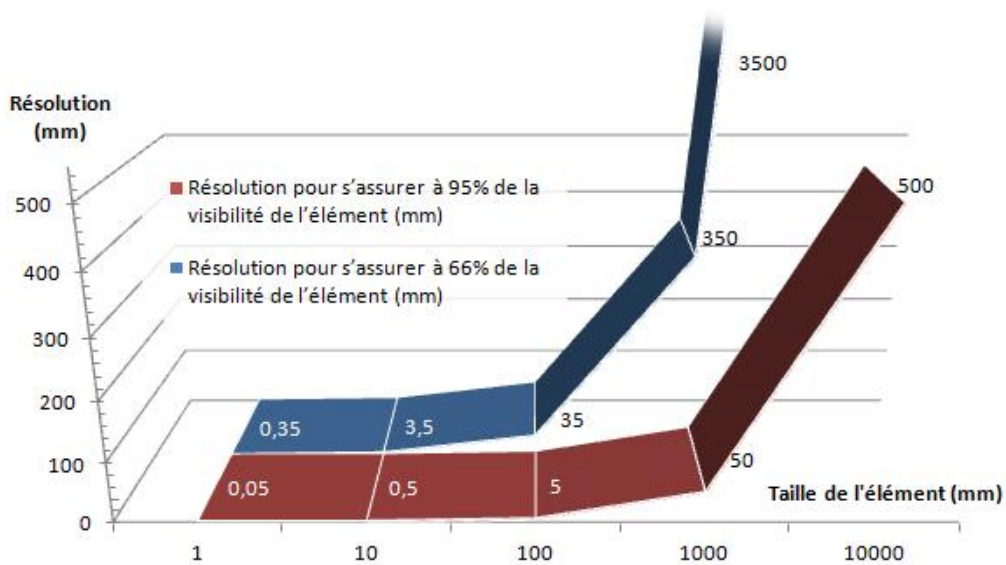


Figure 10. Recommandation sur le taux d'échantillonnage requis en fonction de la taille des éléments étudiés.
D'après: Mills, Andrews, 2011

En tout état de cause, aucun instrument n'est capable de numériser dans le détail des objets de grandes dimensions : leurs capacités à numériser de grands objets sont même opposées à leurs aptitudes à effectuer des relevés détaillés. Il est alors nécessaire d'identifier les éléments demandant un niveau de détail élevé pour ensuite combiner différentes techniques dans le but de mener l'acquisition à différentes résolutions.

Outre les considérations géométriques, la dimension photométrique est une variable importante, car la qualité des données que sont capables d'enregistrer les différents dispositifs de numérisation varie grandement. D'autres éléments sur lesquels l'attention doit être portée sont le coût et les compétences nécessaires à la mise en œuvre des techniques de numérisation. Avec les techniques de photogrammétrie SfM/DMVR, l'automatisation des différents processus (orientation, calibration, création du nuage de points) permet d'obtenir des modèles tridimensionnels précis alors que peu de compétence n'est requise. L'exemple de ces techniques récentes de photogrammétrie est d'autant plus probant que la création de ces modèles est assurée par *cloud computing*, de manière indépendante de la puissance du matériel utilisé par l'utilisateur de ces services.

II.4.d. Bilan sur l'acquisition tridimensionnelle

Aujourd'hui, les techniques d'acquisition tridimensionnelle utilisées dans le cadre de projets de numérisation de patrimoine architectural se composent d'un large éventail d'outils, que de récentes avancées en photogrammétrie ont permis de compléter.

Le choix de l'outil dépend de plusieurs facteurs : les propriétés géométriques, les caractéristiques des matériaux des objets étudiés, mais aussi les objectifs et les moyens du projet. Privilégier une technique d'acquisition au profit d'une autre doit s'effectuer de manière à minimiser l'impact que ces facteurs ont sur le projet. Pourtant, quelle que soit la technique utilisée, les données produites lors de l'acquisition ne satisfont pas les nouvelles attentes portées par les modèles virtuels en matière de communication et de recherche telles que nous les avons présentées au chapitre I.1.a. Pour faire des données brutes acquises par les outils présentés dans le présent chapitre des modèles tridimensionnels capables d'interagir avec d'autres ressources, il faut encore leur faire subir un certain nombre de traitements qui sont présentés dans le chapitre suivant : *Rétroconception d'objets architecturaux*.

Chapitre III. Rétroconception d'objets architecturaux

Les données brutes acquises par les outils et techniques présentées précédemment se traduisent par des ensembles de points définis par des triplets de coordonnées : des nuages de points. Ces données ne sont pas exploitables en l'état et doivent subir plusieurs traitements quels que soient les objectifs du projet. Le poids des données est notamment trop volumineux pour qu'elles soient directement exploitables dans une application sur internet. Le chapitre précédent a également mis en évidence certaines limites des techniques d'acquisition en présence de masques, d'occlusions ou en limites d'objets. Ces limites provoquent alors une absence d'information dans le relevé, et même des données erronées par la présence de bruit.

Dans le domaine de la numérisation du patrimoine, la rétroconception est un traitement intervenant dans le cadre de la modélisation basée sur la réalité (ou *reality-based modeling* comme généralement décrite dans la littérature anglophone) que l'on oppose traditionnellement à la CAO (Guidi et al., 2007). C'est un processus d'analyse d'un objet architectural numérisé (Figure 11, d) dont on cherche à identifier les composants à partir de connaissances formalisées. C'est pour cela que la rétroconception est également appelée reconstruction basée sur les connaissances (Hmida et al., 2012), car elle fait appel à une base ou à un modèle de connaissance (Figure 11, a). Cette formalisation des connaissances sur le domaine auquel appartient l'objet étudié, ou connaissances métier (Fuchs, 2006) ou encore connaissances *a priori* (Fredericque, 2008 ; Bey, 2012 ; Guidi et al., 2007), décrit chacun des composants du domaine en leur donnant un nom et en définissant ses relations avec les autres entités du modèle de connaissance ainsi que ses règles de construction. Les contraintes (Figure 11, b) décrivant les relations entre les composants de l'objet (Weik, Grau, 1996) permettent de segmenter sémantiquement le modèle numérisé (Figure 11, f) et donc d'y apporter une strate de significations. À la fin de cette première étape, les données brutes sont segmentées (Figure 11, g), mais le modèle géométrique n'est toujours qu'une représentation sous forme de points ou de maillages segmentés. La segmentation sémantique a permis d'identifier les composants de l'objet architectural étudié : des sous-objets (Tableau 2, p.55), également appelés *architectural features* dans la littérature anglophone. La seconde étape est l'ajustement d'objets géométriques paramétriques métier sur le modèle segmenté (Figure 11, h). La reconstruction basée sur les connaissances produit ainsi un modèle géométrique auquel sont associées d'autres informations d'ordre sémantique (Figure 11, i).

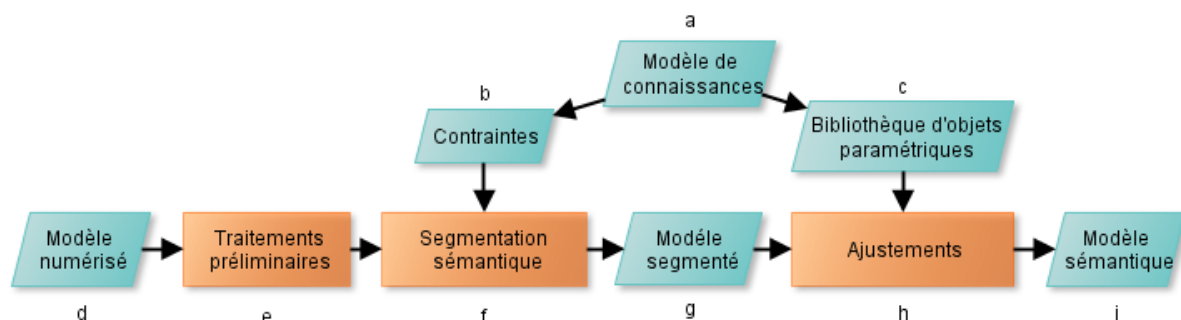


Figure 11. Principe de la rétroconception

Les différentes étapes présentées précédemment sont abordées plus en détail dans ce chapitre. Après une courte présentation des origines de la rétroconception dans la partie III.1, les différentes opérations entrant en jeu lors de ce processus sont présentées. Tout d'abord, les traitements précédents les opérations ayant recours au modèle de connaissance sont décrites dans la partie III.2, avant d'introduire le concept de segmentation en partie III.3. La modélisation paramétrique est au cœur des enjeux de la rétroconception. La partie III.4 est ainsi l'occasion de présenter la modélisation paramétrique au regard des enjeux patrimoniaux. Enfin, la modélisation des connaissances à la base de la modélisation paramétrique et de la rétroconception est exposée dans la partie III.5.

III.1. Origine de la rétroconception

Utilisée depuis plusieurs décennies dans les domaines aussi variés que l'industrie aéronautique, automobile ou d'outillage, la rétroconception est présente également en électronique ou en informatique. Ce processus a pour objectif principal l'étude d'un produit pour en déduire sa méthode de fabrication, son coût, ses matériaux, ses dimensions, etc. :

« *Reverse engineering (RE) refers to creating a computer-aided design (CAD) model from an existing physical object, which can be used as a design tool for producing a copy of an object, extracting the design concept of an existing model, or reengineering an existing part.* »¹⁸
(Várady et al., 1997)

Les applications sont nombreuses (Bradley, Currie, 2005) : espionnage industriel, recréation d'objets qui n'existent plus, ou pour lesquelles documentations et informations sont indisponibles ou inaccessibles. Mais dans le cadre de la numérisation du patrimoine, la rétroconception est surtout un processus capable d'apporter une réponse à la fois aux limites des données des techniques d'acquisition et aux enjeux de valorisation du patrimoine numérisé (Figure 12).

¹⁸ La rétroconception est le processus de création d'un modèle de conception assisté par ordinateur (CAO), issu d'un objet physique existant, qui peut être utilisé comme un outil de conception pour la production de réplique de l'objet, pour expliciter son concept ou pour la réingénierie d'un de ses composants (traduction auteur).

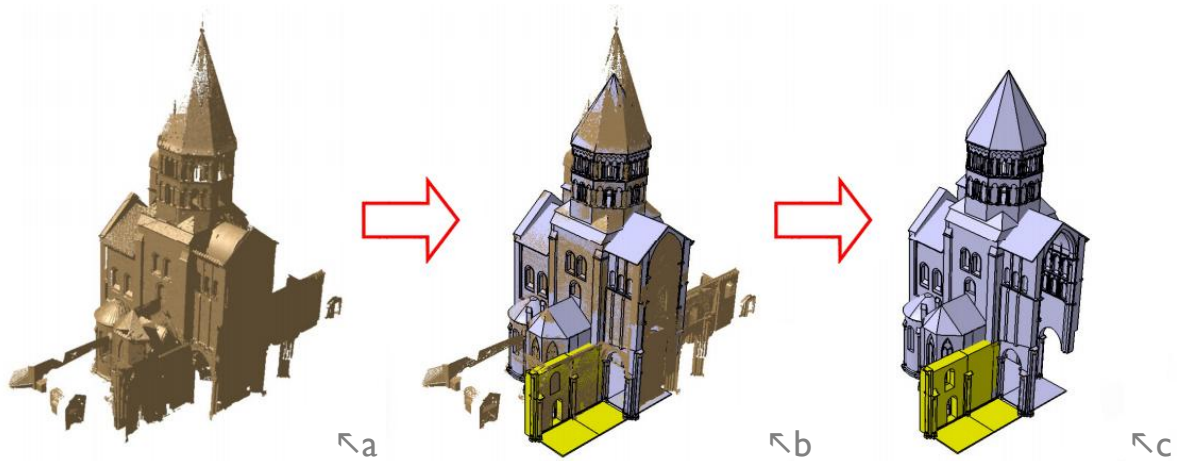


Figure 12. Mise en œuvre d'un processus de rétroconception pour le projet de reconstruction virtuelle de Cluny III. À partir des données relevées (a), un modèle paramétrique est ajusté (b) pour permettre une reconstruction virtuelle de Cluny III (c) exploitable dans un projet de « plateforme collaborative interdisciplinaire, dite SIG 4D ».

D'après : Landrieu et al., 2011 ; Rollier-Hanselmann et al., 2012

III.2. Traitements préliminaires : consolidation, nettoyage et maillage

Rares sont les objets pour lesquels un seul relevé suffit (Figure 13). Il est souvent nécessaire de multiplier les points de vue pour couvrir entièrement l'objet ce qui résulte en la création de plusieurs fichiers de nuages de points. La consolidation est l'étape permettant d'intégrer différents nuages de points dans un référentiel unique et de les fusionner une fois le recalage réussi. Ce processus peut être conduit de manière quasi automatique par l'utilisation *in situ* d'éléments de référence qui assurent la présence d'un référentiel commun aux différents relevés. Quel que soit le cas, des logiciels de traitement de nuage de points comme Geomagic Studio¹⁹, CopyCAD²⁰, 3D Reshaper²¹ ou Rapidform XOS²² (devenu Geomagic XOS) permettent de consolider les données brutes *a posteriori*. Ces mêmes logiciels permettent également d'effectuer un nettoyage du nuage de points en enlevant les données non utilisables telles que les parties mal numérisées ou non nécessaires au projet comme celles appartenant à d'autres objets (le support par exemple). Mais pour des raisons de visualisation (Koutsoudis, Vidmar, Arnaoutoglou, et al., 2013) et de calcul (Camarero, 2013), il est généralement plus aisé de conduire ce processus une fois le nuage de points triangulé.

La triangulation d'un ensemble de point ou polygonisation (*meshing*) est le processus visant à la création d'un maillage non structuré par le biais d'algorithmes comme Delauney, Poisson, *Marching Cubes*, etc. (Figure 14). Cette opération est aussi largement automatisée et disponible dans les logiciels précédemment cités.

¹⁹ <http://www.geomagic.com/fr/products/studio>

²⁰ <http://www.copycad.com/>

²¹ <http://www.3dreshaper.com/>

²² <http://www.rapidform.com/products/xos>



Figure 13. Une consolidation est nécessaire à la fusion en un seul maillage des cinq relevés effectués à une résolution de 0,5 mm de l'ilot 23 du plan-relief de Toul (b) alors qu'il ne couvre une surface que d'une vingtaine de centimètres carrés.

Photos : auteur

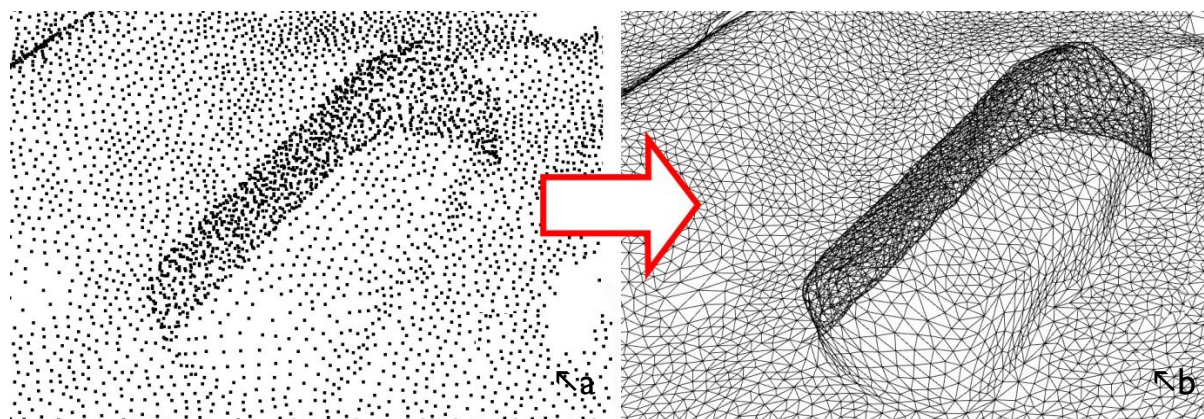


Figure 14. Un nuage de points (a) représentant un bâtiment de corps de garde sur une demi-lune du plan-relief de Toul et son maillage obtenu par polygonisation (b).

Au terme de ces opérations, le relevé tridimensionnel est remplacé par un maillage unique représentant de manière indifférenciée un ensemble d'objets que l'on peut identifier et extraire grâce à traitement avancé : la segmentation.

III.3. Segmentation des données

La segmentation des données a pour objectif le regroupement d'ensembles de points selon des modèles prédéfinis, qui peuvent être géométriques (III.3.a) et/ou métiers (III.3.b), grâce à des contraintes (direction des normales des surfaces, parallélisme, relations géométriques entre des objets métier, etc.).

III.3.a. Segmentation géométrique

Alors que les opérations décrites en III.2 sont, depuis plusieurs années, disponibles et largement automatisées dans des logiciels commerciaux, le processus de segmentation y est assez récent. Opérée sur le maillage ou directement sur les points du nuage, la segmentation consiste à regrouper des séries de points ou de triangles en fonction d'objets appartenant à la géométrie du plan (polygone, disque, etc.) ou de l'espace (surface par extrusion et par loft dans le cas de l'exemple de la Figure 15).



Figure 15. Segmentation avec le logiciel Geomagic Studio d'un collecteur d'admission numérisé. Le maillage a été automatiquement analysé et segmenté en fonction d'une typologie d'objets géométriques prédéfinis : plan, extrusion, etc. D'après : *geomagic.com*

III.3.b. Segmentation sémantique

Conçu pour la modélisation d'informations du bâtiment, le logiciel Revit²³ d'Autodesk est le point de rencontre de plusieurs initiatives visant à automatiser le processus de reconstruction géométrique de données architecturales numérisées. Autodesk expérimente ainsi des outils permettant d'extraire de manière interactive des objets architecturaux (murs, sol, terrain, tracés régulateurs) à partir de nuages de points.

Un premier exemple est le projet GreenSpider (Garagnani, Manferdini, 2013 ; Bregianni, 2013) développé par le TC Labs de l'université de Bologne. Greenspider est une extension du logiciel Revit qui permet de transformer les points issus du nuage brut en paramètres d'entrée pour des outils de modélisation géométrique existants dans le logiciel. Néanmoins, les points importés dans Revit sont déjà segmentés géométriquement. Dans la Figure 16, les points ont été regroupés pour définir des lignes polygonales qui permettent la création d'une surface selon une opération de *loft* une fois importées dans le logiciel. Les surfaces ainsi créées sont dépourvues de sémantique (ce ne sont pas des objets métier) et de nombreuses opérations manuelles sont encore nécessaires pour que cette géométrie devienne des objets architecturaux.

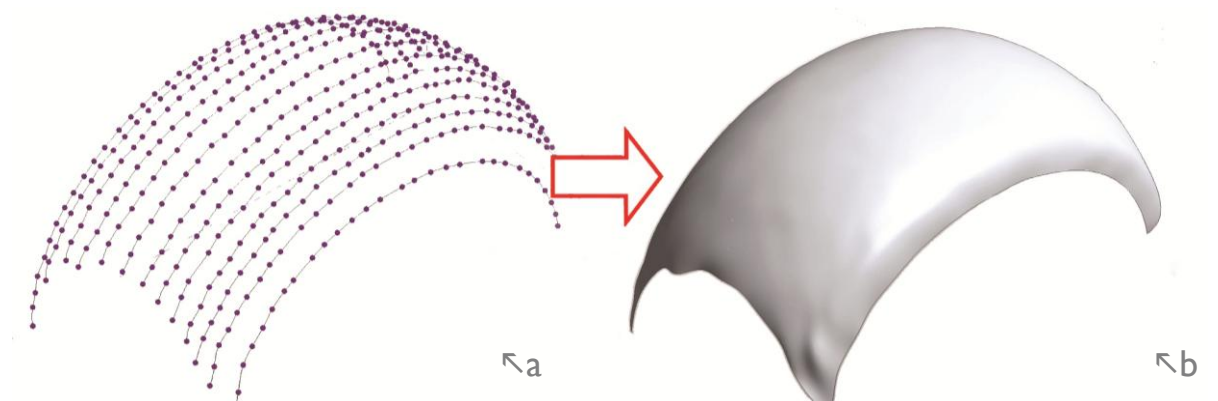


Figure 16. Création d'une voûte à partir d'un nuage de points qui a été segmenté manuellement pour permettre la création de courbes servant à générer une surface (*loft*). Des traitements sont encore nécessaires pour faire de la surface une instance d'objet architectural de type voûte. D'après : *tcproject.net*

²³ <http://www.autodesk.fr/products/autodesk-revit-family>

D'autres initiatives ont également été développées pour le logiciel Revit. Plus ambitieuses que Greenspider, elles impliquent en particulier des opérations de segmentations sémantiques et de reconstruction paramétrique. ReCap Studio²⁴ d'Autodesk, CloudWorx²⁵ de Leica, Scan to BIM²⁶ d'Imaginit sont des extensions commercialisées de Revit qui permettent un premier pas vers un flux continu, depuis la segmentation du relevé tridimensionnel jusqu'à la création d'un modèle paramétrique de CAO. À la différence des logiciels cités dans la partie III.2, Revit est un logiciel métier dans lequel sont manipulés des objets architecturaux et non des objets géométriques. Or, les fonctionnalités des extensions citées diffèrent peu de celles proposées par les logiciels généralistes. Après avoir segmenté géométriquement les nuages de points par sélection manuelle de points appartenant à des zones d'intérêt (sol, mur, etc.), l'utilisateur doit encore spécifier la nature de l'objet à créer pour qu'une instance d'objet paramétrique issue de la bibliothèque Revit par exemple, y soit ajusté. La Figure 17 illustre les quelques fonctionnalités de traitement de nuages de points intégrées au logiciel d'Autodesk pour la version 2012 de Revit. Le processus repose sur de nombreuses interactions avec l'utilisateur et le choix des objets paramétriques y est limité. La reconstruction d'un mur courbe doit être effectuée en plusieurs temps : sélection du type d'entité à extraire (mur droit, mur courbe, étage, empreinte de bâti par exemple), sélection de la zone d'intérêt et enfin création d'un mur paramétrique (*Basic Wall : Generic – 200 mm*, dans le cas de notre exemple) que l'on pourra modifier à volonté.

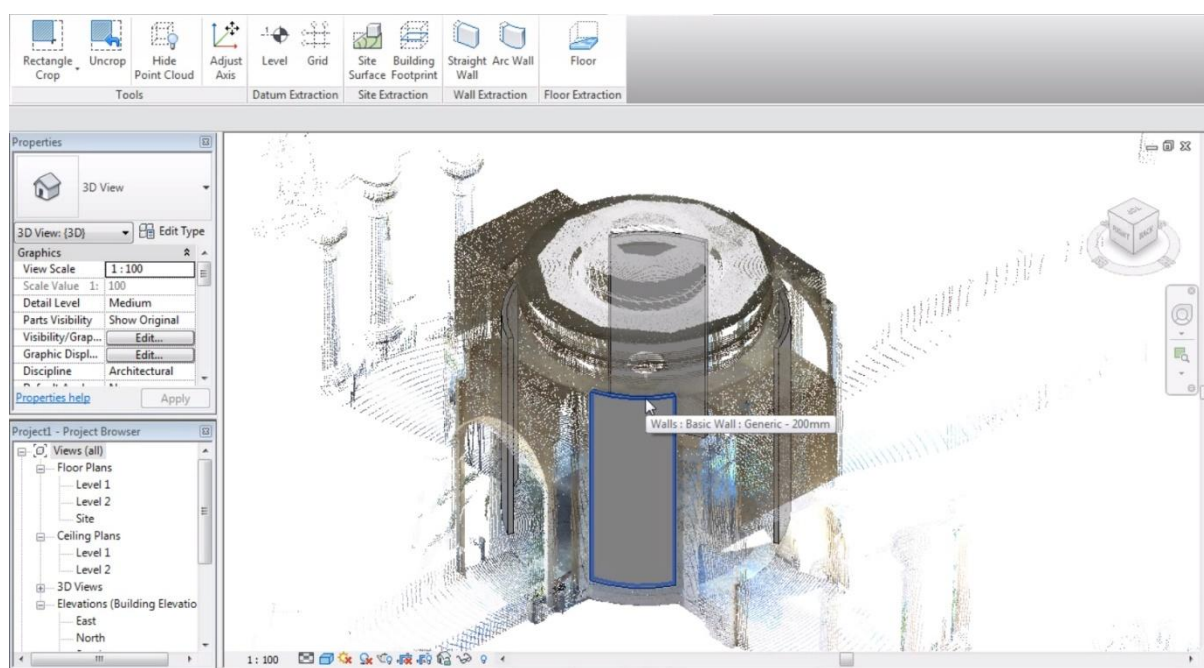


Figure 17. Ajustement d'objets paramétriques de la bibliothèque d'Autodesk Revit à partir des données d'un nuage de points. Quatre murs courbes issus d'une bibliothèque métier sont ajustés après sélection du groupe de points pertinents. D'après : Autodesk Labs, 2012

²⁴ <http://www.autodesk.com/recap>

²⁵ http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-CloudWorx-for-Revit_97854.htm

²⁶ <http://www.imaginit.com/software-solutions/building-architecture/scan-to-bim>

À la fin de la segmentation, il devient possible pour chaque ensemble de points segmenté d'y substituer un modèle paramétrique qui est, par nature, dépourvu des limites inhérentes aux relevés tridimensionnels. C'est ce processus, qui a pour donnée d'entrée un nuage de points et en sortie un modèle paramétrique, qui est appelé rétroconception. Du fait de sa nature paramétrique, le produit de la rétroconception permet l'emploi de modèles tridimensionnels précis sans que cela ne se traduise par des volumes excessifs de données. Enfin, il est surtout à même de conférer à un modèle paramétrique 3D une dimension sémantique supplémentaire en lui associant étroitement d'autres paramètres, d'autres données (cycle de vie, économique, etc.).

III.4. La modélisation paramétrique pour le patrimoine architectural

La modélisation paramétrique a pour principale caractéristique l'abstraction. Au lieu de définir et de stocker de grandes quantités de données géométriques sous forme de points comme pour un modèle polygonal (un maillage), on leur substitue un modèle mathématique (une instance d'un objet paramétrique). Dans la partie III.4.a sont développés les principaux avantages de la modélisation paramétrique comme le gain en termes de poids de données et en temps de travail. L'utilisateur a en effet un contrôle accru sur son travail par la manipulation de concepts concrets ce qui se traduit par des paramètres qui ne sont plus géométriques, mais métiers (Ebert, 2003).

La modélisation procédurale, telle que la modélisation par grammaires de formes, est une application avancée de la modélisation paramétrique. Présentée dans la partie III.4.b, la modélisation procédurale, et ses applications en reconstruction virtuelle pour le patrimoine, se distingue de la modélisation paramétrique par un haut degré d'automatisation, mais également des objectifs différents.

III.4.a. La reconstruction architecturale par modélisation paramétrique

La modélisation géométrique paramétrique est une discipline où sont définis des algorithmes capables de générer de la géométrie (Kelly, 2013 ; Agbodan, 2002). Des langages de programmation textuels à l'image des langages de scripts comme le MEL de Maya²⁷ (Chevrier, Perrin, 2009 ; De Luca et al., 2006), le JavaScript (Schinko et al., 2010) ou encore le GML (Havemann, 2005) ont été utilisés avec succès pour la création de modèles paramétriques pour des projets de reconstruction virtuelle d'objets patrimoniaux. Mais ces langages étant textuels, leur utilisation est conditionnée par l'apprentissage de langages de programmation.

Aujourd'hui, de nombreux modeleurs paramétriques destinés aux concepteurs sont implantés dans le milieu professionnel (Boissieu, 2013). La modélisation paramétrique est en effet étroitement liée à la conception assistée par ordinateur même si des projets précurseurs l'ont utilisée dans un cadre patrimonial. Appliqués à la création de modèles virtuels patrimoniaux, ces outils ont déjà prouvé leur intérêt dans des

²⁷ <http://www.autodesk.fr/products/autodesk-maya>

projets ayant recours à des logiciels de modélisation paramétrique : Archicad²⁸ d'Abvent (Murphy et al., 2007), Revit d'Autodesk (Ludwig et al., 2013 ; Pauwels et al., 2008), CATIA²⁹ de Dassault Systèmes (Bae, 2002). Disposant de bibliothèques paramétriques métiers, il est possible de les compléter par programmation graphique par la création de nouvelles familles d'objets (Boeykens, 2012).

Une autre solution, accessible aux acteurs du patrimoine (architecte, archéologue, etc.), repose sur l'adjonction d'éditeurs de langage de programmation visuelle (« *visual dataflow modelling* ») à des modélisateurs généralistes (Rhino³⁰ de McNeel, MicroStation³¹ de Bentley, Houdini³² de SideFX) ou métier (Revit). Ces éditeurs (Grasshopper³³, Generative Component³⁴ ou Dynamo³⁵) permettent de créer des modèles paramétriques complexes par l'implémentation d'algorithmes selon un formalisme innovant. Les éditeurs de langages de programmation visuelle sont des logiciels dans lesquels des symboles graphiques, c'est-à-dire des composants encapsulant des opérations ou des données, sont mis en relation par des liens, formant ainsi un flux de données entre composants de manière que la sortie d'un composant est reliée à l'entrée d'un autre composant (Boissieu, 2013 ; Branquinho de Oliveira, 2012). À côté de la représentation abstraite où se trouve le programme (Figure 18), ces éditeurs disposent comme tout modélisateur paramétrique, d'une représentation explicite de l'objet en cours de construction (Agbodan, 2002). Le principe du flux de données « linéaire et dirigé » (Boissieu, Guéna, 2012) propre à ces langages est également une limitation pour des opérations d'itération, de récursivité et pour la manipulation de listes (Janssen, Chen, 2011 ; Davis et al., 2011). Pour ce type d'opérations, il reste possible de faire appel à des composants spécifiques permettant à l'utilisateur de programmer dans des langages de niveau plus faible comme Visual Basic, C# ou Python dans le cas de Grasshopper par exemple. Enfin, lorsque les programmes deviennent trop lourds, le réseau de composants et de connecteurs tend à devenir illisible, et cela, même pour celui à l'origine du programme. Finalement, l'un des points forts de Grasshopper sur ces concurrents est sa communauté d'utilisateurs/développeurs qui enrichit ce langage avec des fonctionnalités permettant de pallier le problème de récursivité ou d'interopérabilité avec le BIM par la mise en place d'extension³⁶ (HoopSnake et Chameleon respectivement).

²⁸ <http://www.abvent.fr/software/archicad/>

²⁹ <http://www.3ds.com/fr/produits-et-services/catia/>

³⁰ <http://www.rhino3d.com/>

³¹ <http://www.bentley.com/fr-FR/Products/MicroStation/>

³² <http://www.sidefx.com/>

³³ <http://www.grasshopper3d.com/>

³⁴ <http://www.bentley.com/en-US/Promo/Generative%20Components/default.htm>

³⁵ <http://autodesktvasari.com/dynamo>

³⁶ <http://www.food4rhino.com/>

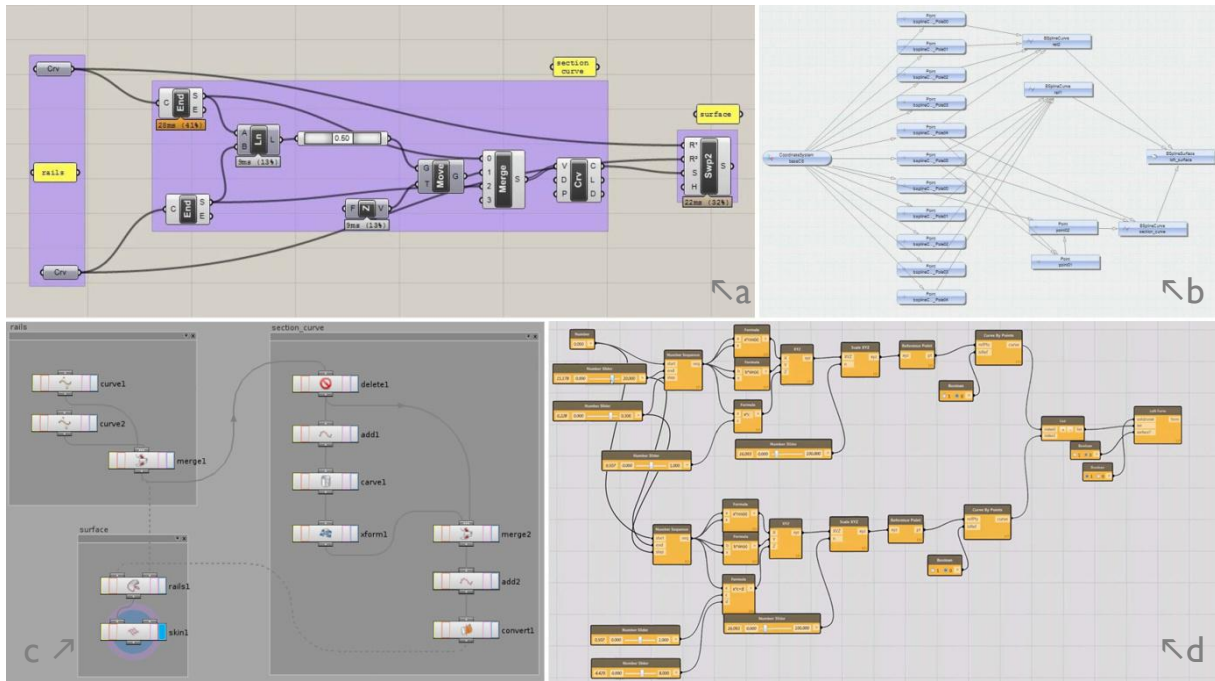


Figure 18. Comparaison de quatre représentations abstraites³⁷ qui définissent le programme pour la création d'une surface à partir de courbes (« loft ») sur Grasshopper (a), Generative Component (b), Houdini (c) et Dynamo (d) (des captures en grands formats sont disponibles en annexe).

D'après : Janssen, Chen, 2011 et <http://youtu.be/8E1Ph7yAuGk>

III.4.b. La reconstruction architecturale par modélisation procédurale

L'analogie entre l'architecture et le langage permet d'identifier un lexique ou vocabulaire de l'architecture (l'ensemble des termes du domaine définissant les objets) et une grammaire (l'ensemble des règles de construction définissant les contraintes entre les objets). Chaque courant, école, style, etc. se caractérise par une grammaire de formes spécifiques. Il existe donc un lien privilégié entre les grammaires de formes et les modèles de connaissance. Tous deux partagent une connaissance commune sur l'objet étudié en particulier à travers la formulation des règles de constructions (Grobler et al., 2008).

Une grammaire de forme consiste en des règles de constructions de formes et des algorithmes de génération qui sélectionnent et exécutent les règles de manière récursive à partir d'une forme initiale (Figure 19). Les règles spécifient comment une forme est substituée par une autre selon des transformations géométriques paramétriques (translation, homothétie, rotation, etc.). Un nombre fini de règles et de formes permet alors de générer un nombre infini de solutions grâce à la variation des valeurs des paramètres (Tepavčević, Stojaković, 2012). Les grammaires de formes peuvent être utilisées comme un outil de conception à l'image du logiciel commercialisé CityEngine (Esri, 2013) et son format : le CGA shape (« *Computer Generated Architecture shape* »), développé initialement par Pascal Müller dans le cadre de sa thèse. CGA shape, bien que créé pour être utilisé dans le domaine de la conception architecturale, a également été expérimenté sur de vastes environnements patrimoniaux faisant l'objet de reconstructions virtuelles à l'image des projets Rome Reborn 2.0 ou Ancient Pompeii (Haegler et al., 2009). Dans cette ap-

³⁷ cf. Comparaison des représentations d'un algorithme sur quatre éditeurs de programmation visuelle, page 228

proche, l'étude de typologies de bâtiments permet l'abstraction de règles ayant présidé à la construction des deux cités. Ensuite, la forme initiatrice du processus de génération provient de données issues de la numérisation de la maquette *Plastico di Roma antica* (Rome Reborn) ou d'empreintes de bâtiments identifiées à partir de restes archéologiques (Ancient Pompeii). À la fin du processus, une solution est proposée sous la forme d'un bâtiment respectant à la fois le style architectural induit par les règles de constructions prédéfinies et les dimensions issues de relevés. Cet objet n'est donc pas une reconstruction fidèle à un objet ayant existé, mais une des solutions adaptées à un courant architectural et à un contexte physique. D'autres solutions peuvent être générées sans s'affranchir du style architectural et urbain de la cité.

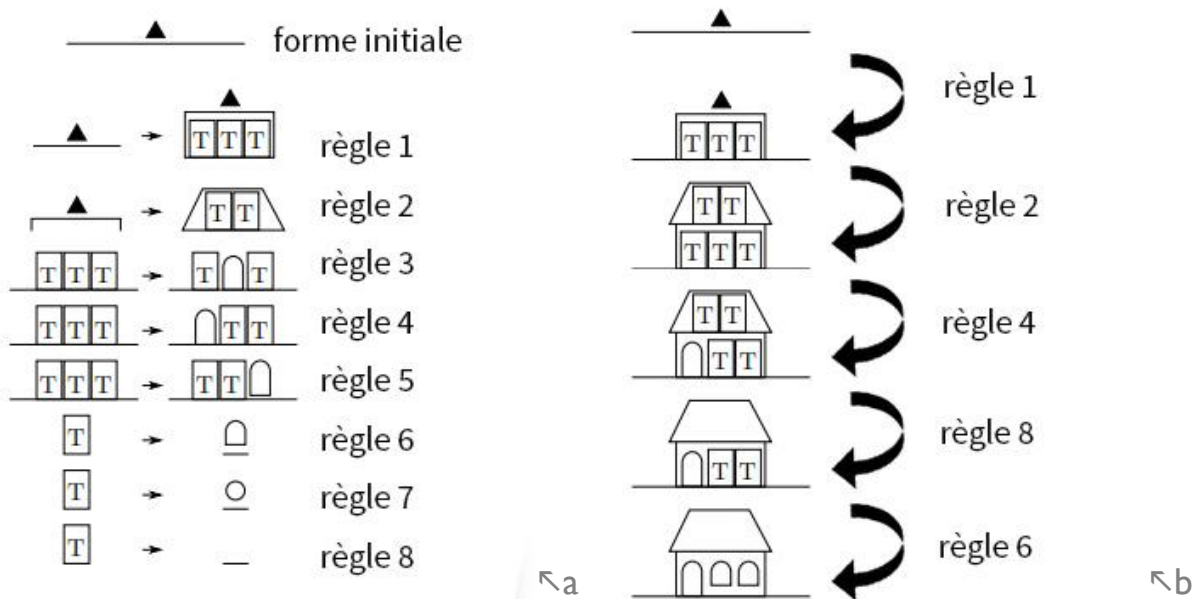


Figure 19. Grammaire de formes comprenant huit règles de formes (a) et application des règles pour la création d'un bungalow (b).
D'après : Kelly, 2013

III.4.c. Limites et perspectives des approches paramétriques et procédurales

Aujourd'hui, la modélisation géométrique par grammaire de formes est largement utilisée dans les domaines du jeu vidéo et du cinéma pour la génération automatique de végétations ou de paysages (Mojoworld³⁸, Terragen³⁹ et SpeedTree⁴⁰ par exemple) et de villes (Ibele, 2013 ; Couturier, 2013 ; Keffer, 2011) à l'instar de la Rome antique du Projet Rome Reborn avec City Engine⁴¹ ou de New York avec CityBot⁴² (White, 2006). L'utilisation d'un tel processus ne peut répondre qu'à des objectifs clairement énoncés qui sont différents de processus de reconstruction virtuelle. En l'absence de données initiales suffisantes (acquisition incomplète, absence de restes archéologiques, etc.) et/ou dans le cas de projets dont l'objectif n'est pas une reconstruction fidèle à la réalité, le recours à une modélisation procédurale est pos-

³⁸ <http://www.pandromeda.com/>

³⁹ <http://www.planetside.co.uk/>

⁴⁰ <http://www.speedtree.com/>

⁴¹ <http://www.esri.com/software/cityengine>

⁴² <http://www.cgarchitect.com/2006/04/interview-with-chris-white-on-king-kong>

sible. L'objectif est alors de créer des évocations virtuelles, c'est-à-dire des environnements réalistes à un contexte temporel et géographique donné.

Malgré les avantages déjà énoncés de la modélisation paramétrique pour la reconstruction virtuelle du patrimoine, le recours à un langage de programmation peut être un frein pour les architectes, les designers, etc. (Kelly, 2013). Cependant, le succès des langages de programmation visuelle dans le domaine de la conception offre aux acteurs cités la capacité de s'approprier plus facilement des outils tout aussi efficaces pour la reconstruction de modèles géométriques et adaptés aux enjeux de la reconstruction virtuelle patrimoniale.

Enfin, même si ces derniers langages offrent de nouvelles perspectives pour la modélisation paramétrique appliquée à la reconstruction d'objets issus du patrimoine, la création et la manipulation de tels objets sont conditionnées par la mise en place d'un modèle de connaissance précis qui définit chacun des objets et les relations qu'ils entretiennent.

III.5. Modélisation des connaissances architecturales

La modélisation paramétrique, et par conséquent la rétroconception, nécessite une modélisation précise des connaissances du domaine auquel appartient l'objet d'étude. Dans le cas de l'architecture, qu'elle soit civile, religieuse ou militaire, les connaissances de chaque domaine ont déjà été formalisées à travers la publication de traités entre le XVI et le XIXe siècle. Chaque objet architectural y est identifié tandis que des règles permettent la création d'objets plus complexes par assemblage d'objets de niveaux inférieurs, c'est-à-dire d'objets le composant (Tableau 2). En reprenant comme référence l'analogie entre l'architecture et le langage, le processus de rétroconception d'un objet numérisé de rang n est un processus

Niveaux	Objets	Notions	Exemples
n1	Matériel	Constituant	Mortier, brique, profilé, etc.
	Vide	Creux	Rainure, creux de brique, etc.
n2	Matériel	Élément	Mur, cloison, mobilier, etc.
	Vide	Percement	Baie, trémie, réservation, etc.
n3	Matériel	Division	Enveloppe, distribution, etc.
	Vide	Espace	Pièces, loggia, entrée, etc.
n4	Matériel	Ensemble	Édifice, bâtiment, maison, etc.
	Vide	Entité urbaine, paysagère	Rue, place, jardin, etc.

Tableau 2. Structure générale des objets architecturaux (« *architectural features* »). Des objets de niveau n sont des composants d'objets de niveau supérieur à n . Dans cette classification, chaque objet à une dimension matérielle et une dimension vide.

D'après : Hanrot et al., 1987

dans lequel la structure de l'objet est recherchée grâce aux contraintes (la grammaire) existant entre les objets de rangs inférieurs à n et composant l'objet principal (Dekeyser et al., 2003).

Dans la partie III.5.a, une présentation de quelques-uns des principaux schémas de classification (thésaurus, ontologie, etc.) est établie avant de recentrer notre propos au domaine de l'architecture et en particulier à celui de la conception en architecture dans la partie III.5.b. Enfin, la partie III.5.c est l'occasion d'explorer l'utilisation de modèles de connaissance architecturale existants appliqués à la reconstruction géométrique d'objets du patrimoine numérisés.

III.5.a. Schémas de classification pour l'organisation des connaissances

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 déterminée » (Bibliothèque nationale de France, 2011). Par exemple, la classification phylogénétique, un des nombreux systèmes de classification des êtres vivants, permet de rendre compte des degrés de parenté entre les espèces et donc de retracer leur évolution. Un exemple en architecture est la classification des ordres classiques grecs et romains selon leurs caractères distinctifs (Vignola, 1642).

Pour identifier les concepts d'un domaine, il est tout d'abord nécessaire d'avoir un ensemble de termes partagés et faisant consensus au sein d'un groupe de praticiens. La mise en place d'une liste de termes normalisés ou d'un vocabulaire contrôlé permet de classifier et de décrire l'information tandis que la taxonomie organise de manière hiérarchique ce vocabulaire sous la forme de relations parents-enfants (Pidcock, 2013). Le thésaurus va plus loin en mettant en œuvre des relations associatives, d'ordre sémantique (causalité, localisation, composition, temporelle, etc.) en addition aux relations parents-enfants. De cette manière, le thésaurus permet également d'informer sur les sujets connexes. Il peut être considéré comme une forme d'ontologie dont la grammaire n'a pas été formalisée (Université Paris Descartes, 2013). L'ontologie est une description formelle (compréhensible par une machine) et explicite d'un ensemble de concepts, ou classes, d'un domaine de connaissances (Guarino, 1997). Ces concepts sont organisés de manière hiérarchique, et associative (ou sémantique) à travers des relations, ou propriétés créées entre les différents termes du vocabulaire (Tableau 3). Les propriétés de chaque concept décrivent des caractéristiques et attributs du concept (attributs, rôles ou propriétés) et des restrictions sur les attributs (facettes ou restrictions de rôles). Le modèle ainsi créé est une base de connaissances qui peut être utilisable par une machine (Noy, McGuinness, 2001).

Dans le domaine architectural et urbain, on peut identifier deux ontologies qui sont mises en œuvre pour la production, l'analyse et le partage de modèles 3D intégrant des informations géographiques et du bâtiment : il s'agit des modèles de données IFC sur lequel s'appuie l'approche BIM (*Building Information Modelling*) et CityGML qui décrit objets et relations de système d'information géographique ou GIS en anglais (*Geographic Information System*).

Niveaux	Schémas de classification	Définitions
n1	Vocabulaire contrôlé	Liste définie de termes
n2	Taxonomie	(n1 + organisation hiérarchique)
n3	Thésaurus	(n2 + organisation sémantique)
n4	Ontologie	(n3 + grammaire formalisée)

Tableau 3. Schémas de classification selon leur niveau de formalisme.

III.5.b. Les modèles de données en conception pour l'architecture

Les approches BIM sont l'objet de nombreuses attentes du fait de leurs capacités à répondre aux enjeux de documentation et de conservation du patrimoine (Fai et al., 2011). Elles permettent la création de modèles 3D sémantiques qui peuvent être partagés grâce à des outils de travail collaboratif. Le modèle IFC est un format de données utilisé dans les systèmes d'information BIM et qui a pour vocation de permettre l'interopérabilité logicielle dans le secteur de l'architecture, l'ingénierie et la construction. Ce modèle de données est proche du format des ontologies (MMLab, 2011) puisqu'il organise, de manière sémantique et formalisée par le biais du standard IFC (norme ISO 10303-21), plusieurs centaines d'entités ou classes définies (mur, sol, plafond, mais aussi, coût, relation, etc.) et par ses propriétés (les attributs). Ces classes ont des relations hiérarchiques (zone, étage, salle) et sémantiques (x est contenu dans y, p. ex.).

Dans les systèmes d'information géographique, le GML⁴³ (*Geography Markup Language*) a été développé pour assurer l'interopérabilité dans le secteur de l'information géographique (Open Geospatial Consortium, 2009). C'est un langage dérivé du XML qui permet de manipuler et d'échanger des données géographiques (Norme ISO 19136). Le GML permet de définir ses propres formats, des schémas d'applications XML comme CityGML, qui assurent l'interopérabilité des données dans des domaines variés. L'engouement pour les modèles 3D de villes comme support d'information a entraîné l'émergence du modèle de données CityGML dont l'objectif est de parvenir à une modélisation commune des différentes entités, attributs et relations que manipulent les modèles virtuels de villes.

Les modèles de données IFC et CityGML peuvent être assimilés à des ontologies qui partagent des similitudes (Figure 20) – ils permettent de décrire des modèles de bâtiments, ou de villes – et pour lesquels il existe un enjeu d'interopérabilité (El-Mekawy, Östman, 2010 ; Mignard et al., 2012) et même des logiciels commerciaux comme IfcExplorer⁴⁴ et FME⁴⁵ (conversion monodirectionnelle : depuis les IFC vers CityGML). Alors que les systèmes d'information géographique ont été conçus pour décrire des objets exist-

⁴³ À ne pas confondre avec le Generative Modeling Language (Havemann, 2005)

⁴⁴ http://www.ifcwiki.org/index.php/IfcExplorer_CityGML_Export

⁴⁵ <http://www.safe.com/fme/fme-technology>

tants, l'approche BIM est employée dès les phases de conception du projet et tout du long du cycle de vie du produit.

Dans les systèmes d'information géographique et les approches BIM, la capacité des modèles 3D générés et manipulés à structurer la sémantique, à assurer l'interopérabilité et à faciliter la collaboration suscite aujourd'hui l'intérêt de la recherche pour une meilleure représentation et gestion des informations dans le domaine de la numérisation et de la valorisation du patrimoine.

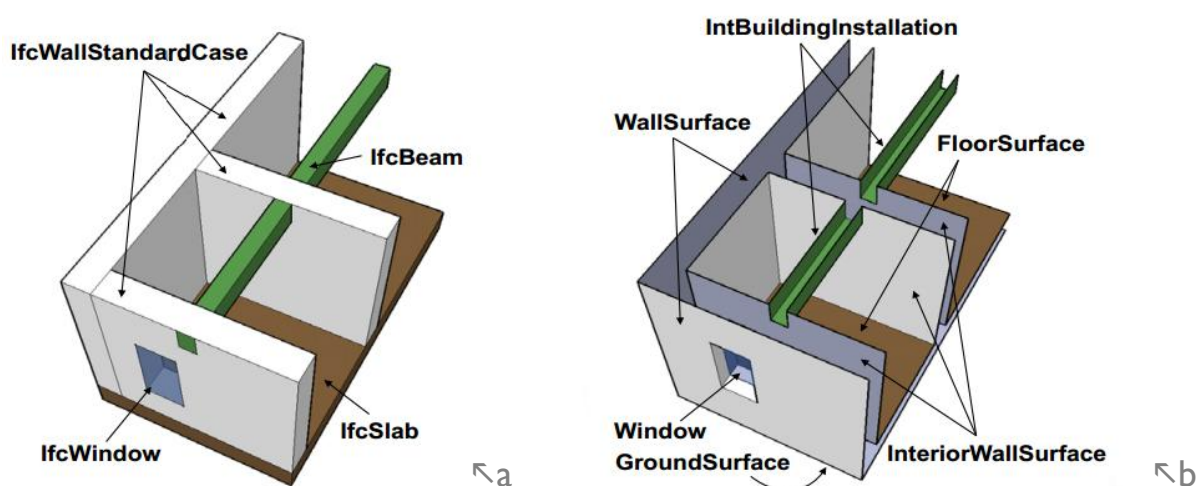


Figure 20. Vue en éclatés d'une représentation tridimensionnelle d'un étage d'immeuble au format IFC (a) et CityGML (b). Les modèles partagent des concepts communs à l'image des objets *ifcWallStandardCase* et *WallSurface* ou *IfcSlab* et *FloorSurface*.

D'après: Nagel et al., 2009

III.5.c. Les ontologies dérivées des approches BIM et SIG pour la reconstruction virtuelle

Les modèles de données utilisés dans les approches BIM et dans les SIG sont également étudiés dans le domaine du patrimoine numérique avec pour objectif principal la création de modèles 3D enrichis (Döllner et al., 2006) à l'image de la reconstruction tridimensionnelle de plusieurs pièces du Fort San Giorgio sur l'île de Capraia en Italie (Lorenzini, 2009). L'utilité de CityGML dépasse ici le domaine de la modélisation de ville puisque le modèle de données est utilisé pour organiser sémantiquement un modèle géométrique reconstruit à partir de données relevées. Un autre exemple est celui de la reconstruction virtuelle de la maquette intitulée *La cité de Liège vers 1730* (Billen et al., 2009). À partir du relevé 3D, des « *geo-objects* » sont recréés sur des modélisateurs 3D en respectant la structuration des données définie par CityGML. L'objectif étant la création d'une « *geo-database* » comme médium d'informations archéologiques. Des projets comparables ont été menés avec des logiciels BIM. La reconstruction virtuelle d'une synagogue pragoise (Boeykens et al., 2012) ou d'un casino gantois (Pauwels et al., 2008) a ainsi été réalisée sur Archicad pour bénéficier du modèle de données BIM notamment pour la réalisation de modèles 3D sémantiques. Le HBIM (*Historical Building Information Modelling*) de Murphy (2007), utilise également Archicad pour la création d'une bibliothèque d'objets paramétriques appartenant au domaine (école, style, courant, etc. architectural) de l'objet numérisé. Cette approche s'appuie sur la possibilité offerte par le

logiciel de créer et manipuler de nouveaux objets pour enrichir le modèle de données existant sur Archicad (Murphy et al., 2013).

Dans tous ces projets, la reconstruction géométrique est opérée manuellement avec des logiciels paramétriques assurant ainsi le lien entre le modèle 3D créé et des informations non géométriques. Certains projets utilisent activement les ontologies comparables à celles utilisées dans les approches BIM et les systèmes d'information géographique pour aider la reconstruction géométrique et par là même enrichir sémantiquement le modèle 3D. Ainsi, depuis le début des années 2000, de nombreux projets ont utilisé la connaissance architecturale pour permettre une optimisation de la phase de reconstruction géométrique. L'automatisation du processus de reconstruction géométrique s'appuie alors sur des ontologies conçues spécifiquement à cette attention. Néanmoins, ces projets se concentrent sur deux grands types d'objets qui sont les façades (Nuchter et al., 2003 ; Cantzler et al., 2002 ; Dekeyser et al., 2003) et les espaces intérieurs (Böhm et al., 2007 ; Pu, Vosselman, 2009 ; Müller et al., 2007).

Le projet de Müller se démarque des autres par l'utilisation d'outils de modélisation procédurale lors de la phase de reconstruction géométrique. À partir d'une image, un algorithme de segmentation permet d'isoler les différents niveaux et trames de la façade. Il en résulte un réseau de carreaux (« *tiles* ») contenant chacun une ouverture. Un nouveau traitement permet de subdiviser (« *split* ») les éléments présents dans chaque carreau. À la fin de ces étapes de segmentation, il est fait recours à une bibliothèque d'objets architecturaux dont on ajuste des instances aux données segmentées. Les règles de construction des façades (hiérarchie, dimensions, etc.) sont ensuite formalisées à l'aide d'une grammaire de formes (CGA shape), dont l'un des atouts est son indépendance à la taille du modèle géométrique.

III.6. Bénéfices de la rétroconception appliquée au patrimoine

L'optimisation géométrique et la création de modèles enrichis sémantiquement sont deux enjeux actuels de la numérisation du patrimoine. Ces deux points sont cruciaux, car ils permettent de répondre à une demande nouvelle : celle de la mise à disposition de contenus 3D à travers des programmes scientifiques comme 3D-Icons dont la visée est l'enrichissement d'Europeana par l'ajout d'un millier de modèles 3D de monuments, de plus de 4000 modèles 3D de détails architecturaux, etc. (D'Andrea et al., 2012).

III.6.a. Optimisation géométrique

La taille des modèles 3D, aussi bien sur le plan de la géométrie que des textures, augmente bien plus rapidement que la puissance des matériels et des logiciels, ce qui restreint l'utilisation possible de ces modèles (notamment en matière d'interactivité, du rendu temps réel, de la diffusion sur internet, etc.) (Remondino, 2011). La simplification géométrique du nuage de points est un exemple de réponse à l'enjeu de diffusion à grande échelle et de valorisation du modèle par les technologies de l'information et de la communication. La plupart des objets architecturaux peuvent être définis à l'aide de primitives ou de combinaison de primitives géométriques dont le nombre de points est de loin inférieur au nuage de points, ce qui permet d'alléger le poids des fichiers des modèles 3D.

La rétroconception permet tout d'abord une optimisation et une homogénéisation (Schinko et al., 2010) de la géométrie en substituant au maillage polygonal imparfait (occlusions, acquisition des parties saillantes, etc.) un ensemble de formes géométriques canoniques, c'est-à-dire « de raisonner, non pas uniquement sur une approximation plus ou moins grossière des courbes et des surfaces, mais sur un modèle mathématique précis » (Nazarian, 2013). Du point de vue de la modélisation tridimensionnelle, cela revient à ajuster un ou des objets paramétriques B-Rep (*Boundary Representation*) ou CSG (*Constructive Solid Geometry*) (Watt, 2000) sur un modèle maillé.

Évoquées précédemment, des extensions comme ReCap Studio, CloudWorx, Scan to BIM permettent de créer tels modèles géométriques. En outre, ces extensions permettent un premier pas vers un flux continu, depuis la segmentation du relevé tridimensionnel jusqu'à la création d'un modèle géométrique optimal et enrichi.

III.6.b. Enrichissement sémantique

Un autre développement récent des modèles 3D repose sur leur utilisation en tant que modèles de données ou documents 3D (Bilasco, 2007). Des modèles existants sont d'ores et déjà réappropriés par les acteurs de la numérisation du patrimoine. Qualifiés d'historiques, de patrimoniaux ou de nD, ces modèles 3D enrichis s'inspirent des approches BIM (Murphy et al., 2007 ; Ludwig et al., 2013) ou des systèmes d'information notamment géographiques comme dans le cas de nombreux projets de numérisation de maquettes historiques (Kersten et al., 2012 ; Billen et al., 2009 ; Nebiker et al., 2009 ; Sangouard, 2011). Ces modèles sont plus qu'une représentation de l'objet en 3D puisqu'ils renferment des informations de natures variées à l'image des IFC qui sont capables d'intégrer aussi bien les paramètres géométriques de l'objet que des données temporelles, économiques, etc. (Bergin, 2011 ; Lee et al., 2005).

Du reste, la rétroconception est l'étape qui permet aux données brutes issues de l'acquisition tridimensionnelle de répondre à la définition du relevé d'architecture. Alors que ce terme désigne traditionnellement le processus de mesure qui permet de connaître les dimensions, les formes et les rapports des différentes parties de l'objet étudié (Saint-Aubin, 1992) – mais aussi son résultat, c'est-à-dire une représentation telle que le dessin par exemple (Pérouse De Montclos, 2000) – une distinction doit être opérée pour le relevé numérique. Dans ce dernier cas, le relevé consiste en une phase d'acquisition tridimensionnelle (lasergrammétrie, photogrammétrie, etc.) générant des données brutes sous forme de nuages de points. Ce résultat est intermédiaire. Les traitements qu'il subit par la suite doivent permettre la création d'une représentation porteuse « de sens, de réflexion, d'intelligence et de sensibilité » (Mazières, 2011, p. 6) à l'image du relevé traditionnel qui lui dépasse :

« le stade de la représentation, pour s'intéresser à la collecte d'indices, qui va éclairer les étapes constructives, les matériaux, les conditions de conservation, les désordres structurels, physiques et chimiques... Le relevé est donc porteur de significations. »

(Mazières, 2011, p. 6)

Lorsque le processus de segmentation est mené jusqu'au niveau sémantique, la rétroconception rend possible l'identification dans le relevé tridimensionnel de l'ensemble des composants de l'objet étudié. Les modèles substitués au maillage ne sont plus des primitives géométriques (cube, sphère, etc.) ou des surfaces paramétriques (NURBS), mais des instances ajustées de modèles paramétriques appartenant au domaine de l'objet étudié (porte et mur pour un objet de type bâtiment par exemple). Le modèle est alors plus qu'une représentation tridimensionnelle, il devient un modèle de données de l'objet tel que les modèles IFC (Eastman, 2011) ou CityGML. L'enrichissement sémantique est assuré par le lien entre un modèle géométrique paramétrique ajusté et l'ontologie (Ullrich et al., 2013 ; De Luca et al., 2006). Le modèle paramétrique est ainsi le moyen d'introduire des connaissances supplémentaires sur les composants que l'on cherche à extraire (Fredericque, 2008). Bien que restreint à l'étude de projets de numérisation de maquettes d'architecture, le chapitre suivant corrobore l'effort porté à l'enrichissement sémantique de modèles 3D issus du patrimoine culturel. Nombre de ces projets ont en effet pour objectif la création d'une représentation virtuelle de la maquette ou de la ville qui y est représentée et son intégration dans un système d'information à l'image des SIG.

Chapitre IV. Échantillon de projets de numérisation de plans-reliefs

Au cours de la dernière décennie, de nombreux projets de numérisation de maquettes ont été menés. D'une part, les maquettes étudiées dans ce mémoire sont descriptives : elles représentent un environnement qui peut être **contemporain** à leur fabrication (les plans-reliefs, *La maquette du Port de Nantes en 1900* [Naegel, 2012], etc.) ou **antérieur** (les maquettes de la Rome Antique, *La cité de Liège en 1730*, etc.). Pour quelques-uns, les projets de création de modèles virtuels utilisent la maquette comme source principale ou complémentaire d'information pour la reconstruction virtuelle d'une **ville** à une époque donnée. Dans la majorité des projets, c'est la création d'un modèle virtuel de la **maquette** qui constitue le cœur du projet. On peut résumer ces cas de figure par les illustrations présentées en Figure 22 et Figure 24. Les projets de modèles 3D présentés dans ce chapitre, créés à un instant t , sont des modèles virtuels de maquettes de villes réalisées à un instant antérieur à t ($t_{\text{MAQUETTE}} < t_{\text{MODELE 3D}}$). Ces maquettes sont, quant à elle, une représentation figée, un instantané d'une ville à une date précise. Les maquettes peuvent être soit des modèles réduits de villes contemporaines ($t_{\text{VILLE RÉELLE}} = t_{\text{MAQUETTE}}$) soit antérieures ($t_{\text{VILLE RÉELLE}} < t_{\text{MAQUETTE}}$).

Pour distinguer ces deux types de projets, nous pouvons également utiliser les travaux terminologiques de Jean Claude Golvin (2003). Utilisés à l'origine dans le domaine de la restitution du patrimoine, ces termes peuvent servir à qualifier les modèles virtuels afin de mettre en avant leurs différences.

- 1 Les projets visant la création d'une version numérique de maquettes (et non de l'objet représenté : la ville) peuvent ainsi être qualifiés de reconstructions. C'est un processus visant en la création d'une image théorique d'un objet. Un nouvel objet est créé à l'imitation de l'original, on parle également alors de réplique virtuelle comme dans le cas du projet de numérisation de la maquette de Prague de Langweil (Figure 21).



Figure 21. Réplique virtuelle de Prague (a) et maquette de Prague de Langweil (b).
Modèle 3D et photo : City of Prague Museum

Lorsque l'objectif du projet de numérisation est la réalisation d'un modèle virtuel d'une maquette représentant une ville dans un état qui lui est contemporain ou antérieur, on qualifie le projet de reconstruction (Figure 22). Il s'agit des projets Virtual Leodium (Liège), Nantes 1900, Maquette de Langweil (Prague), PRAM (Genève), d'Hambourg, mais aussi pour les plans-reliefs, des projets de Google, d'Aire-sur-la-Lys, de Saint-Omer, du MAP-CRAI (Toul, Strasbourg et Marsal).

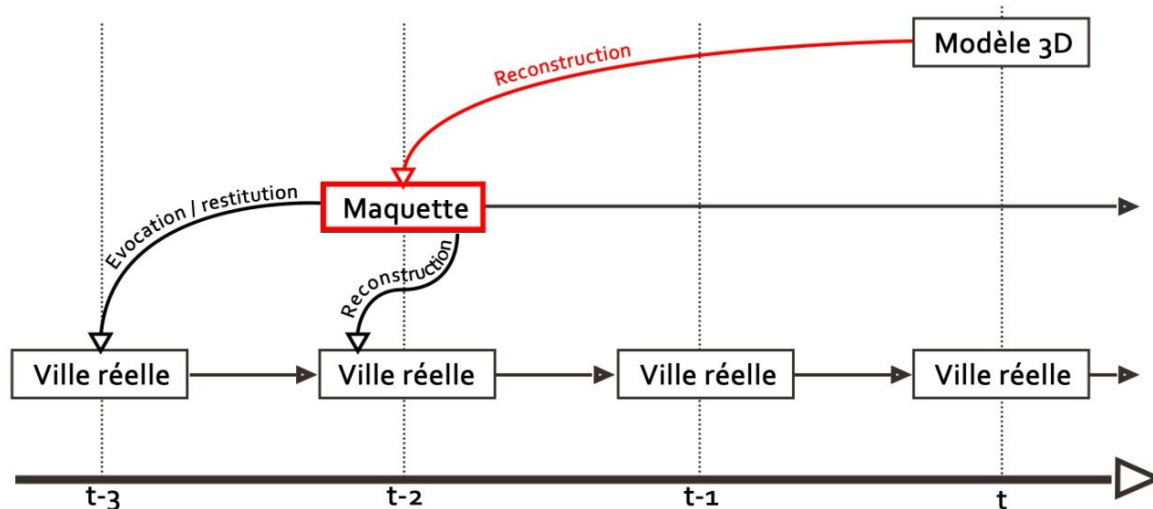


Figure 22. La reconstruction virtuelle d'une maquette pour la création d'un modèle 3D concerne la plupart des projets présentés dans la suite de cette étude. Le modèle 3D est avant tout un modèle d'une maquette qui représente une ville dans un état qui lui est contemporain ou antérieur.

2 Les projets dont l'objectif est la création d'un modèle numérique de l'objet représenté (et non de la maquette) peuvent être soit une restitution, soit une évocation. Par nature, ces projets cherchent à modéliser une réalité qui ne leur est plus accessible et qui par conséquent est sujette à interprétation. Les deux termes précédemment introduits définissent une gradation dans le niveau d'interprétation. La restitution est souvent hypothétique. C'est une représentation de l'aspect présumé d'un objet mutilé ou détruit, l'image qu'il pourrait nous donner si l'on pouvait le revoir tel qu'il était à l'origine. L'évocation est une image ne cherchant pas nécessairement l'exactitude scientifique (Figure 23). Elle fait appel à des mécanismes suscitant l'émotion, la séduction, la rêverie, etc. La nature même des maquettes en fait des évocations (certains des mécanismes ont été présentés dans la partie A, au chapitre I.3).



Figure 23. Évocation virtuelle de Rome (a) et la maquette *Plastico di Roma antica* (b).
Modèle 3D : Bernard Frischer. Photo : Museo della Civiltà Romana

Lorsque l'objectif du projet de numérisation est la réalisation d'un modèle virtuel d'une ville représentée en maquette dans un état qui lui est contemporain, antérieur et postérieur, on qualifie le projet de restitution (Figure 24). Il s'agit des projets Plan de Rome, d'Hambourg et d'AGP pour la place forte de Marsal. La maquette n'est qu'une source parmi d'autres pour la création d'un modèle virtuel de la ville. En l'absence de sources suffisantes, le modèle 3D peut être une évocation et ne proposer qu'une représentation symbolique de la ville comme c'est le cas dans le projet Rome Reborn.

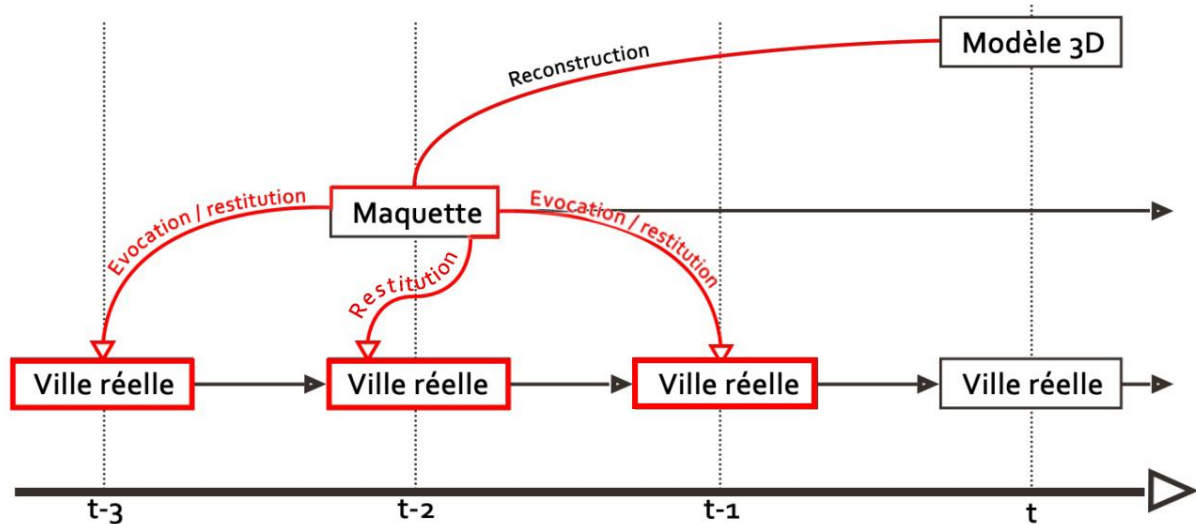


Figure 24. Le modèle 3D peut également être un modèle d'une ville qui est représentée en maquette. La maquette est une des sources d'information pour ces projets de restitution ou d'évocation virtuelle. Elle permet de visualiser l'état d'une ville qui peut être contemporain ou antérieur à la maquette. La maquette peut également permettre de déduire l'état d'une ville à un état postérieur à sa réalisation lorsqu'elle est confrontée à d'autres sources.

Dans un premier temps, de la partie IV.1 à IV.8, notre étude présente une série de projets pour lesquels des maquettes anciennes ont été numérisées. Les caractéristiques physiques et historiques de la maquette, l'objectif scientifique du projet, les moyens mis en œuvre pour l'acquisition tridimensionnelle, le traitement des données et les applications réalisées sont précisés pour chacun des projets avant d'être comparés en fin de chapitre (Tableau 4). Dans cette dernière partie (IV.9), les caractéristiques des maquettes (échelle, date de réalisation, surface, etc.), celles du projet (technique de numérisation employée, recours à des processus de reconstruction automatiques, etc.) et les moyens de diffusion sont confrontés afin de mettre en évidence les spécificités des différents projets ainsi que les facteurs pouvant influencer la réussite des projets.

IV.1. Création de modèles virtuels de la Rome antique

Aujourd'hui existent deux grandes maquettes de Rome à l'époque de Constantin : le *Plan de Rome* du français Paul Bigot, conservée à l'Université de Caen et la *Plastico di Roma antica* d'Italo Gismondi exposée au musée de la Civilisation romaine à Rome. Autour de ces maquettes ont été menés deux projets de modélisation tridimensionnelle de la Rome antique. Ces projets sont présentés dans les parties IV.1.a et IV.1.b, tandis que la partie IV.1.c revient sur le partenariat établi entre les deux projets.

IV.1.a. Le projet Plan de Rome de Bigot

Le *Plan de Rome* de Paul Bigot, architecte et Grand Prix de Rome en 1900, est une des maquettes représentant la capitale romaine. Commencée en 1911, cette maquette en plâtre représente les trois cinquièmes de la ville de Rome à l'époque de Constantin, au début du IV^e siècle (Figure 25, a). D'une surface de 70m², elle est réalisée au 1/400 et est composée de 102 modules. L'objectif de Bigot est de reconstituer « des ensembles monumentaux [...] et non des monuments isolés que leur exemplarité prive déjà de leur contexte » (Hinard, Royo, 1992). Au terme de nombreuses mises à jour, le plan est achevé en 1937. Il connaîtra une renommée telle que trois autres maquettes seront réalisées. Une copie sera conservée à l'Institut d'art et d'archéologie de Paris jusqu'à sa destruction en 1968 (Pérouse De Montclos, 1998). Un autre exemplaire, conservé à l'université de Philadelphie, connaîtra un sort similaire. Le troisième exemplaire du *Plan de Rome* se trouve encore à Bruxelles, aux Musées royaux d'art et d'histoire. Il est le seul survivant avec la maquette originale classée au titre des Monuments historiques en 1978 (base Palissy, 1978) et conservée aujourd'hui à l'Université de Caen Basse-Normandie.

L'équipe « Plan de Rome » de l'Université de Caen lance en 1994 un projet de restitution virtuelle dont l'objet est la Rome de Constantin. Le projet a pour ambition de représenter l'ensemble de la ville, avec la possibilité, pour les ensembles architecturaux pour lesquels il existe suffisamment d'informations fiables, de parcourir aussi bien l'extérieur que l'intérieur de ces espaces. L'un des objectifs énoncés par l'équipe s'inscrit dans la continuité du travail de Paul Bigot. L'architecte a en effet pris en compte les découvertes archéologiques sur la ville de Rome et tout du long de sa vie, il n'a eu de cesse de mettre à jour la maquette. Aujourd'hui encore, notre connaissance sur la Rome antique évolue, et un modèle virtuel est un support que l'on peut mettre à jour bien plus facilement qu'une maquette et, qui plus est, qui est capable de garder une trace des hypothèses de reconstructions antérieures. Ainsi, ce projet fournit aux chercheurs un outil de documentation et d'expérimentation pour tester les hypothèses architecturales et topographiques, mais aussi le fonctionnement de divers équipements dans le contexte de l'époque (Fleury, Madeleine, 2010) tel que les vélums, les rideaux de scènes, les machines de levage, etc. Enfin, le projet a également pour vocation de mettre à disposition de tous un outil de vulgarisation, une représentation réaliste de la Rome antique décrivant la réalité urbaine de la Ville Éternelle. Cependant, la maquette ne sert pas directement à la restitution de Rome (Madeleine, Fleury, 2011). La modélisation des monuments, effectuée manuellement par des infographistes travaillant sur Autodesk 3ds MAX⁴⁶, est réalisée à partir de nombreux documents, dont la maquette, qui ont été préalablement analysés. Étant donné que l'on cherche à restituer des objets architecturaux avec une grande fidélité à la vérité historique, le processus est long et chaque modèle doit être validé par des spécialistes de la Rome antique. Une fois le modèle virtuel (modèle géométrique texturé) validé, il est exploité de différentes manières : images, animations ou interactifs (Figure 25, b).

⁴⁶ <http://www.autodesk.fr/products/autodesk-3ds-max/>

À notre connaissance, aucune numérisation tridimensionnelle de la maquette de Bigot n'a été réalisée. Le sort des maquettes de Paris et de Philadelphie rappelle la vulnérabilité des maquettes. La constitution d'archives numériques de la maquette de Bigot permettrait de constituer une documentation plus complète de ce patrimoine fragile.

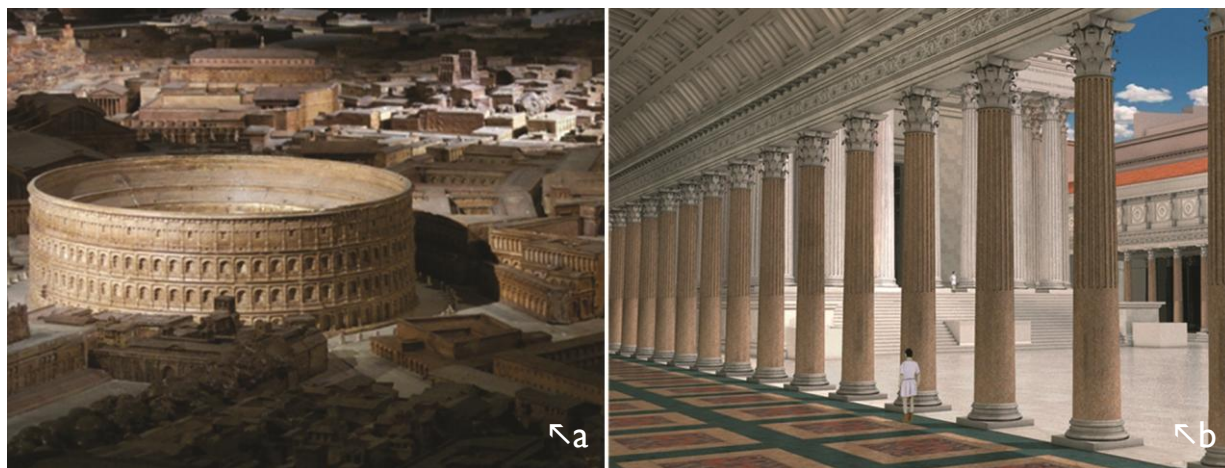


Figure 25. Détail de la maquette de Paul Bigot (a) et restitution virtuelle d'un des portiques du forum d'Auguste dans son état du IV^e siècle ap. J.-C (b).

Photo et modèle 3D: Université de Caen Basse-Normandie 2010.

IV.1.b. Rome Reborn – *Plastico di Roma antica*

En 1937, la maquette de l'italien Gismondi reconstituant la Rome antique est exposée pour la première fois. Elle est réalisée en plâtre renforcé d'armatures métalliques et de fibres végétales pour les parties représentant des constructions. L'échelle principale est de 1/250, mais le relief a été accentué de 15 à 20 % pour en augmenter l'effet (Golvin, 2003). C'est au niveau de l'approche que la différence avec la maquette française est la plus grande, car, au contraire de Bigot, Gismondi interprète moins et ne restitue que la réalité des découvertes archéologiques (Hinard, Royo, 1992).

En 1997 est lancé le projet Rome Reborn visant à illustrer le développement urbain de la ville de Rome de 1000 av. J.-C. à 500 apr. J.-C. Les opérations de numérisation sont conduites uniquement au moyen de capteurs laser. Évoqué précédemment, le choix du capteur laser dépend en grande partie de la taille de l'objet à numériser. Or, cette maquette présente un niveau de détail important sur une surface elle aussi importante (280m²). Un capteur à comparaison de phase⁴⁷ est utilisé pour numériser la maquette dans son ensemble tandis qu'un capteur à triangulation⁴⁸ est utilisé pour l'acquisition des objets les plus petits (Figure 26). Le capteur à comparaison phase, un Leica LR200 est un apport important, car sa précision et sa rapidité sont plus élevées qu'un capteur à temps de vol classique (Guidi et al., 2005).

Néanmoins, les données acquises lors de la numérisation par capteur ont une utilisation limitée dans le processus de restitution. Alors qu'une partie des constructions les mieux documentées, le Circus Maximus, le Colisée ou encore l'aqueduc de Claude, sont reconstruits à l'aide de modeleurs comme Auto-

⁴⁷ cf. Partie A, chapitre II.2.a.a, page 21

⁴⁸ cf. Partie A, chapitre II.2.a.b, page 22

desk 3ds MAX ou Multigen Creator⁴⁹, les 95% restants, des bâtiments anonymes dont l'architecture et la position sont moins bien connues, sont recréés grâce à CityEngine (Dylla et al., 2009), un outil de modélisation procédurale⁵⁰. Pour parvenir à cela, les données acquises par les capteurs 3D sont traitées de manière à classifier par typologie chaque construction selon sa volumétrie globale. Les polyèdres obtenus (Figure 27, a) sont ensuite utilisés comme paramètres pour le modèleur procédural (Figure 27, b). Grâce à la variation automatique des valeurs de paramètres pour la reconstruction des bâtiments, il est possible de reconstruire un vaste environnement urbain plausible proche de ce que Jean Claude Golvin qualifie d'évocation (Figure 27, c).



Figure 26. Détail de la maquette de Gismondi (a) et mise en place du capteur à triangulation (b) pour la numérisation VIVID 910 (Konica Minolta).

Photos : Museo della Civiltà Romana et Guidi et al., 2005

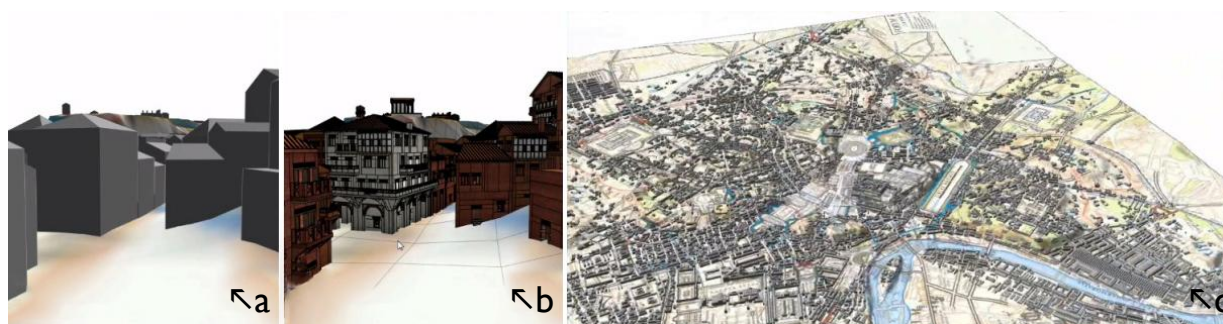


Figure 27. À partir des données numérisées, des polyèdres sont créés et importés dans le modèleur procédural (a) pour la création automatique de modèles respectant à la fois le style architectural induit par les règles de constructions prédéfinies et les dimensions issues de relevés (b). Le résultat est une évocation virtuelle de Rome (c).

Modèles 3D : http://youtu.be/zx_8RbFNjes

IV.1.c. Convergence des deux projets

Bien que traitant du même sujet, les objectifs des deux équipes diffèrent sur un point fondamental. L'équipe de Caen cherche à reconstituer des ensembles architecturaux avec une discipline scientifique tandis que Rome Reborn se concentre sur la création d'un modèle de la ville que l'on peut qualifier d'évocation, une représentation capable de restituer l'ambiance urbaine de Rome aussi fidèlement que possible. En 1998, les deux équipes s'entendent pour profiter du travail de l'autre et enrichir par la même

⁴⁹ http://www.presagis.com/products_services/products/modeling-simulation/content_creation/creator/

⁵⁰ cf. Partie A, chapitre III.4.b, page 41

leurs projets respectifs. Les reconstructions de Caen viennent apporter une plus value d'authenticité au modèle de Rome Reborn tandis que ce dernier sert d'environnement au Français pour mettre en scène les modèles créés par Caen (Fleury, Madeleine, 2010).

Même si une automatisation du processus de reconstruction existe dans le cas de Rome Reborn, l'outil utilisé ne permet la création que d'évocations. La fidélité à l'objet initial, qu'il s'agisse de la ville représentée en maquette ou de la ville réelle n'est pas possible, ce qui explique le choix de CityEngine dans le projet Rome Reborn.

IV.2. Virtual Leodium – La cité de Liège vers 1730

Au tout début du XXe siècle, Gustave Ruhl-Hauzeur (1856-1929) réalise plusieurs maquettes de monuments et de sites de plus grande envergure de la province de Liège. Sa réalisation la plus importante est une reconstitution de la cité wallonne telle qu'elle était au début du XVIIIe siècle. La maquette, nommée *La cité de Liège vers 1730* (Figure 28), est offerte en 1910 à l'université de la ville pour être exposée dans sa bibliothèque (Housen, 2010). À l'image d'autres maquettes, les conditions de conservation ont limité son accès. Réalisée au 1/1200, la maquette ne mesure que 1,13 x 1,06 m (1,19m²) et ne présente ainsi que le centre-ville de Liège.

Virtual Leodium est un projet pluridisciplinaire mené par l'unité de Géomatique de l'Université de Liège dont l'ambition est de produire une reconstruction virtuelle de la maquette, l'objet du projet est la maquette, support d'un système d'information géographique et archéologique d'une dimension urbaine qui permettra la consultation de documents numérisés comme des lithographies, des gravures, des textes, etc. (ULg, 2011).



Figure 28. Détails de la maquette *La cité de Liège vers 1730*.
Photos : ulg Michel Bolly

L'acquisition tridimensionnelle a été réalisée par le laboratoire Hololab de l'Université de Liège. L'utilisation d'un capteur 3D à lumière structurée⁵¹ a permis d'obtenir plus de six cents relevés texturés qui ont été consolidés pour former un maillage de faible précision. Ces données servent ensuite de base à une reconstruction

⁵¹ cf. Partie A, chapitre II.2.b, page 23

manuelle effectuée sur des modélisateurs généralistes comme SketchUp⁵² ou Maya tandis que les textures sont issues de photographies de la maquette étant donné la faible qualité des données photométriques enregistrée par le capteur 3D. En mai 2013, quatre ans après le lancement du projet, seuls 20% de la maquette ont été modélisés et texturés (Pfeiffer et al., 2013) ; la campagne de photographie étant toujours en cours. Une base de données s'appuyant sur un modèle de connaissance dérivé de CityGML permet l'intégration et la mise en relation des objets issus de l'acquisition de documents historiques, mais aussi de l'acquisition tridimensionnelle (Billen et al., 2009). L'application finale utilise ArcGIS⁵³, un logiciel SIG, pour le stockage et la visualisation des données géométriques et sémantiques (Figure 29).

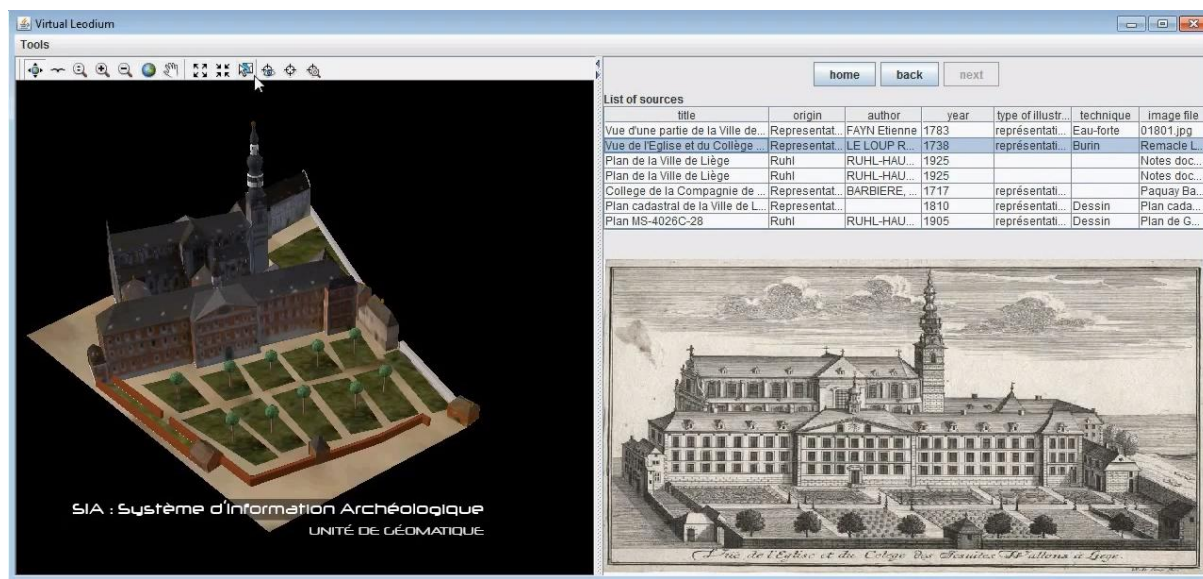


Figure 29. Exploitation de la maquette numérique de *La cité de Liège vers 1730* dans ArcGIS.

D'après : Hervy et al., 2012

IV.3. Le projet Nantes 1900

La maquette du port de Nantes en 1900 réalisée par Pierre Auguste Duchesne (1841-1933) est exposée pour la première fois en 1900 à Paris lors de l'Exposition universelle. D'une longueur de 9,2 m pour une largeur de 1,85 m, la maquette est réalisée à une échelle proche du 1/450 et se compose de seize parties. Les matériaux utilisés sont le papier, le verre, le bois et d'autres matières végétales ainsi que le métal pour les finitions (Musée d'histoire de Nantes, 2013). Le projet de numérisation de la maquette est mené par le laboratoire de l'École centrale de Nantes, de la Faculté des Sciences et du Musée d'histoire de Nantes. L'objectif est la création d'un système d'information utilisant une représentation virtuelle de la maquette pour accéder à des bases de données sur internet. Le modèle virtuel est destiné à être utilisé en surimpression (réalité augmentée) de la maquette existante (Figure 30) pour permettre à l'utilisateur de localiser des zones d'intérêts par le biais d'écrans tactiles (Laroche, Kerouanton, et al., 2011).

⁵² <http://www.sketchup.com/>

⁵³ <http://www.esrifrance.fr/arcgis>



Figure 30. Photographies du prototype de l'application finale.

Photos : SAMOA

L'acquisition tridimensionnelle de la maquette est réalisée avec un REVscan de Creafom, un capteur laser à triangulation⁵⁴ à main extrêmement maniable (Figure 31), ce qui constitue un avantage pour la numérisation des nombreux éléments difficilement accessibles de la maquette (cours intérieures, objets masqués par la végétation, etc.). Avec une résolution de 0.53 mm, c'est plus de deux cents sessions de capture qui ont été nécessaires pour numériser complètement la maquette de Nantes. Parmi les traitements opérés sur les données relevées, une segmentation des nuages de points est menée de manière manuelle (Billen, 2012) pour isoler et reconstruire la géométrie selon qu'elle appartient à des murs ou à des toits de bâtiments, au sol, à la rivière, etc.



Figure 31. Détail de la maquette (a) et acquisition tridimensionnelle (b) par capteur laser à triangulation REVscan (Creafom).

Photos : auteur et (Laroche, Servières, et al., 2011)

⁵⁴ cf. Partie A, chapitre II.2.a.b, page 22

Depuis l'étape de segmentation présentée dans des publications courant 2012, peu de travaux reviennent sur les traitements mis en œuvre pour la reconstruction géométrique et photométrique de la maquette virtuelle. En octobre 2013, un prototype du dispositif final a été présenté à Digital Heritage⁵⁵. L'application finale, qui ne devrait être en place qu'à la fin de l'année 2015 (SAMOA, 2013). Les données relevées lors de l'acquisition n'ont pas encore été exploitées puisque l'application ne propose qu'une navigation sur une photographie de la maquette.

IV.4. PRAM, Le Projet Relief Auguste Magnin (Genève)

En 1878, Auguste Magnin et une équipe d'orfèvres commencent la réalisation de la maquette de Genève. L'objectif de Magnin est de fixer l'image de la ville telle qu'il l'a connue enfant. Après vingt années, la maquette, de 30 m et d'un poids de 800 kg, est achevée. Du cuivre est utilisé pour couvrir les toits, du zinc pour les murs des immeubles et les fortifications tandis que les vitrages sont réalisés à partir de morceaux de miroirs. Elle représente la ville telle qu'elle était un demi-siècle plus tôt, en 1850, avant la destruction des fortifications (Figure 32, a). Les éléments représentés sur la maquette sont à trois échelles différentes : 1/250 pour le plan, 1/200 pour les élévations et 1/100 pour le terrain. Magnin a volontairement doublé l'importance des dénivellations, car il affirme que « l'expérience démontre que les hauteurs doivent être augmentées afin de répondre aux exigences de la vision » (Bonvin et al., 1991). Ce principe d'accentuation des hauteurs a également été adopté par Paul Bigot et Italo Gismondi lors de la réalisation des grandes maquettes de Rome.

Le Projet Relief Auguste Magnin (PRAM) a pour principal enjeu la numérisation de la maquette d'Auguste Magnin. La technique adoptée est la projection de lumière structurée par un capteur ATOS⁵⁶. La précision de cette technique (de l'ordre de 2×10^{-4} mm) (Figure 32, b) et la grande échelle de la maquette (1/250) sont des facteurs favorables à l'obtention de données de qualité.

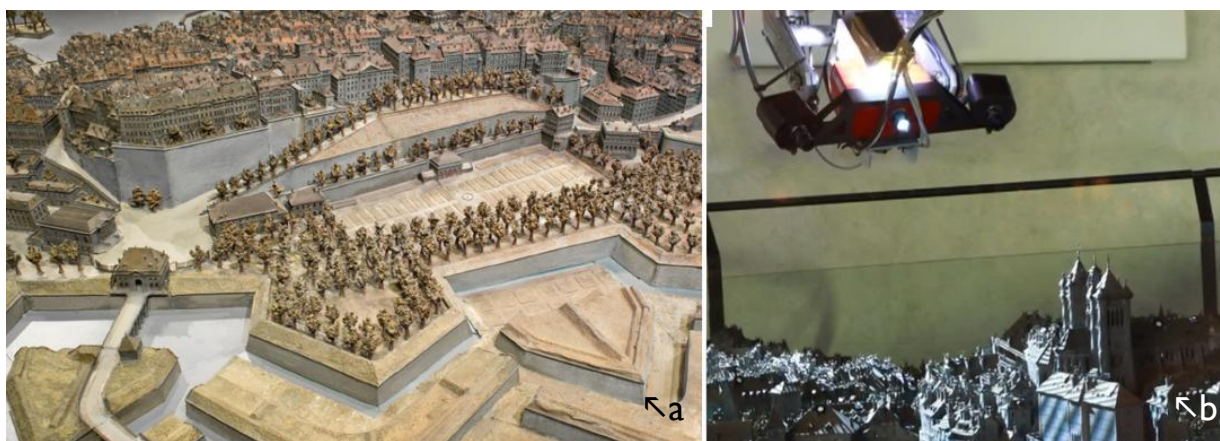


Figure 32. Détail du Relief Magnin (a) et numérisation par capteur à lumière structurée (b).

Photos: PRAM

⁵⁵ <http://www.digitalheritage2013.org/>

⁵⁶ cf. Partie A, chapitre II.2.b, page 22

Les objectifs annoncés de PRAM sont notamment la sauvegarde de la maquette sous la forme d'archives numériques, la numérisation de la documentation du fonds Magnin qui regroupe cartes, photographies, etc. afin de le rendre accessible par le biais d'une représentation virtuelle de la maquette. En effet, la numérisation du *Relief Magnin* permet de compléter les données de bâti3D, un cadastre 3D de Genève faisant partie du SIG officiel du canton de Genève : le Système d'Information du Territoire de Genève ou SITG 3D (Sanguard, 2011). Ce modèle de données est destiné à être consultable en ligne et de manière interactive par un public qui ne se restreint pas à la sphère professionnelle (Figure 33).



Figure 33. Interface du SIG avec l'intégration de la version numérique du *Relief Magnin* et l'affichage en simultanée de notices d'informations relatives aux objets sélectionnés dans la représentation 3D.

Sources; PRAM

Au vu des informations disponibles sur le projet, la reconstruction virtuelle de la maquette, et en particulier des bâtiments, semble avoir été menée manuellement sur 3ds MAX (Sanguard, 2011). Les fortifications bastionnées, présentes sur la maquette, ont très certainement été modélisées de la manière, sans qu'aucun processus d'automatisation n'intervienne.

IV.5. La maquette virtuelle de Langweil (Prague)

Réalisée entre 1826 et 1837, la maquette de Prague d'Antonin Langweil est constituée de 52 tables dont la plus grande mesure 1,6 m x 1 m ce qui permet un bon accès aux différents éléments de la maquette. Bien conservé, la maquette de Prague a des textures riches et nombreuses, mais la volumétrie est généralement simplifiée (les fenêtres sont peintes en trompe-l'œil). Pourtant, c'est une équipe pluridisciplinaire de près de 200 professionnels en robotique, modélisation, programmation et photographie armée de moyens lourds (boroscope⁵⁷, robot) et d'un partenariat avec Autodesk qui s'est attelée à la numérisation de ce plan-relief réalisé au 1/480.

⁵⁷ Appareil proche de l'endoscope

Le musée ayant interdit le recours à des techniques de numérisation active (notamment celles faisant appel à des lasers), le relevé de la maquette a été effectué par photogrammétrie SfM/DMVR⁵⁸. Alors que le sol est généré par segmentation semi-automatique du nuage de points initial (Sedlacek, Zara, 2009), les bâtiments sont restitués à partir de points acquis manuellement (Buriánek, 2011 ; Sedlacek, Zara, 2011). Le logiciel d'Autodesk ImageModeler⁵⁹ a été modifié pour répondre aux besoins spécifiques du projet de numérisation de la maquette de Prague. Pour leur part, les fortifications bastionnées présentes sur la maquette ont été modélisées manuellement, l'attention étant surtout portée sur la reconstruction des bâtis.

La réplique virtuelle de la maquette de Prague est ensuite utilisée conjointement avec une base de données pour enrichir le modèle 3D. L'application finale, qui est déclinée sur différents supports (CDs et internet), est un système d'information interactif (Figure 34), dans lequel la maquette 3D sert d'interface pour accéder à des documents.



Figure 34. Reconstruction virtuelle de la maquette de Prague (a) et capture d'écran de l'interface du modèle virtuel de la maquette de Langweil (b).

Modèle 3D : <http://www.langweil.cz/>

IV.6. La maquette virtuelle d'Hambourg

Réalisée en 1936, à une échelle approchant le 1/1000, la maquette en bois de la ville d'Hambourg représente Hambourg et ses fortifications en 1644 (Figure 35). L'objectif du projet est la création d'un système d'information géographique 3D exploité sur Google Earth de la cité d'Hambourg à différentes époques. La maquette, ainsi qu'une carte de 1859, sert de base à la création de représentations virtuelles à différentes époques. Seules les reconstructions virtuelles de 1644 et 1859 s'appuient sur une source directe : la maquette et la carte respectivement. Pour les modèles 3D représentant la ville d'Hambourg en 1200, 1400 et 1589, le modèle virtuel de la maquette est modifié pour évoquer la ville à ces époques tandis que le modèle de 1700 est basé sur le modèle virtuel de la carte de 1859.

⁵⁸ cf. Partie A, chapitre II.3.b, page 26

⁵⁹ <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?id=11390028&siteID=123112>

L'acquisition des données est effectuée grâce à un capteur à lumière structurée⁶⁰ ATOS I 2M atteignant une précision de 40 microns. Le relevé consiste en 431 scans pour un volume total de 821 millions de points. Certains processus ont été automatisés pour le traitement des données relevées. Un logiciel a ainsi été créé spécialement pour le projet. À partir du nuage de points, il parvient à extraire l'empreinte de chacun des 5000 bâtiments recouvrant la maquette. À chaque empreinte est ensuite associé un bâtiment paramétrique dont les dimensions sont ajustées automatiquement en fonction des caractéristiques locales du nuage de points.



Figure 35. Photographie de la maquette de la ville d'Hambourg.
Photo : Hamburg Museum/Ulrike Pfeiffer.

Deux hypothèses favorables à la réussite des processus décrits ci-dessus ont été faites. Il est ainsi considéré que tous les toits sont en bâtière et que toutes les constructions sont composées de quatre murs. Le projet n'est pas achevé, mais les premiers résultats annoncés montrent qu'un peu moins de 20% des bâtiments reconstruits présentaient des déviations trop importantes par rapport à la tolérance fixée (+/- 2 mm par rapport aux données brutes). Des ajustements manuels doivent être appliqués pour corriger la géométrie. Les bâtiments les plus complexes sont quant à eux segmentés manuellement de manière géométrique avec le logiciel CloudWorx pour l'extraction de profils et d'empreintes servant de base à la reconstruction volumétrique (Kersten et al., 2012). Les fortifications bastionnées présentes sur la maquette, si elles n'ont pas été modélisées selon cette dernière approche, ont très certainement été reconstruites manuellement.

IV.7. Les reliefs de paysages suisses

Hormis les projets précédents centrés sur l'acquisition de données tridimensionnelles à partir de maquettes de villes, un autre type de modèles réduits a fait l'objet d'expérimentation de numérisation : il s'agit de maquettes paysagères appelées également reliefs de paysages.

Franz Ludwig Pfyffer von Wyher (1716-1802) réalise entre 1762 et 1786 une maquette de grande dimension considérée comme la plus ancienne maquette de paysage au monde et classée aujourd'hui en tant que monument du patrimoine (Gletschergarten Luzern, 2013). Fruit de vingt années de travail, le Relief de la Suisse centrale (6,7m x 3,9m) représente une zone de près de 4100 km² – soit 10% du pays –

⁶⁰ cf. Partie A, chapitre II.2.b, page 23

au 1/12500. Les matériaux qui le constituent sont variés : bois, terre cuite, charbon, carton, plâtre et sable, le tout recouvert d'une couche de cire d'abeille pour l'imperméabilisation. Il est conservé aujourd'hui au jardin des Glaciers à Lucerne.

Un projet de reconstruction tridimensionnelle et d'évaluation de la précision de maquettes est amorcé par Jana Niederröst de l'ETA de Zürich en 2001 (Niederröst, 2001 ; Gletschergarten Luzern, 2013). Les objectifs annoncés sont la création d'une maquette virtuelle du relief pour la préservation du patrimoine, l'analyse de la précision du relief pour enrichir les connaissances en histoire de la cartographie et l'étude sur les moyens que Pfyffer a employés pour effectuer le relevé initial et le mode opératoire pour la réalisation de la maquette. La prise de photographies pour la stéréophotogrammétrie a été réalisée dans des conditions difficiles puisque le relief est conservé dans une salle étroite sans éclairage naturel. Un modèle numérique de terrain est ensuite créé à partir de 48 paires de photographies.

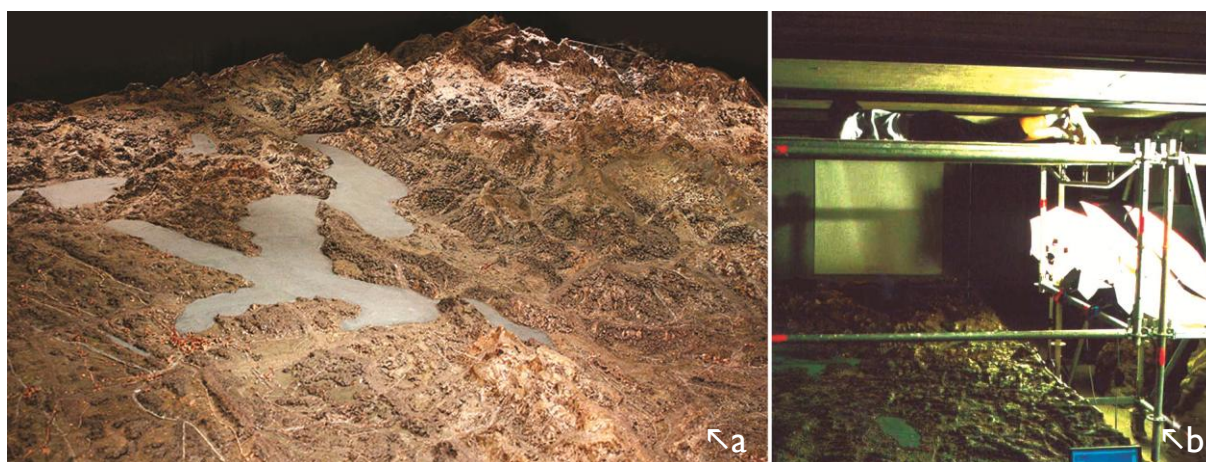


Figure 36. Le Relief de la Suisse (a) centrale de Franz Ludwig Pfyffer von Wyher et le dispositif d'acquisition photogrammétrique (b).

D'après : Niederröst, 2002 ; Gletschergarten Luzern, 2013

Un second projet a été mené sur un relief de paysage suisse. Les maquettes étudiées sont celles de Joachim Eugen Müller (1752–1833), topographe et constructeur prolifique de reliefs (Jouty, Odier, 2009). Là encore, le projet vise à établir la précision de la représentation par rapport à son modèle. La numérisation est effectuée à l'aide d'un capteur à triangulation⁶¹ Vivid 900 avec une précision de 0,44 mm seulement. À l'échelle des maquettes étudiées (1/120 000), la précision sur le terrain est d'une cinquantaine de mètres (Pearson et al., 2009).

Même si l'objet numérisé est une maquette, ces projets diffèrent fondamentalement par la représentation, son échelle et surtout par l'objectif. Comparer le paysage représenté en maquette et la réalité ne nécessite que peu d'intervention sur les données numérisées. Au contraire, le nuage de points, une fois les traitements préliminaires appliqués, est utilisé directement pour une comparaison avec, par exemple un relevé lidar⁶² du relief réel.

⁶¹ cf. Partie A, chapitre II.2.a.b, page 22

⁶² cf. Partie A, chapitre II.2.a.a, page 21

IV.8. Autres projets de numérisation de maquettes

Enfin, d'autres projets peuvent encore être mentionnés. En Suisse, deux maquettes au 1/500 réalisées par l'architecte Hans Langmack à Zurich ont été numérisées. Le premier projet porte sur la maquette de Zurich conservée au musée Haus zum Rech de Zurich (Archives de l'histoire de l'architecture et archives municipales) et dont une application est disponible en ligne (Baugeschichtliches Archiv, 2013). La conduite de ce projet, intitulé « 3D Reconstruction of the city model "Zürich um 1800" », et qui a été mené par l'ETH de Zurich (ETH Zürich, 2013), n'a pas été l'objet de publication. Le second projet concerne la maquette de Soleure, en Suisse. Réalisée en 1921 par Langmack, la maquette est à une échelle de 1/500, mesure 2m x 2,5m et est recouverte de près de 900 bâtiments réalisés en carton (Nebiker et al., 2009). Numérisées dans le cadre d'un projet de création d'une réplique virtuelle, les données brutes n'ont été utilisées que pour aider à la reconstruction manuelle de la géométrie. Cette dernière est par ailleurs simplifiée pour permettre une consultation de la maquette virtuelle sur Google Earth.

Notons enfin la publication d'une thèse en allemand (Jedrzejak, 2008) dont l'un des enjeux porte sur la numérisation d'une maquette au 1/500 de la ville de Duisbourg, en Allemagne, et l'automatisation du processus de reconstruction à partir des données relevées. Dans ce cas aussi, la visualisation du modèle virtuel est assurée par Google Earth. Bridés par les limites de cette plateforme de visualisation cartographique, les modèles 3D présentent des géométries et textures très peu précises.

IV.8.a. Les projets de numérisation de plans-reliefs

Le constat qui a été établi précédemment sur la qualité des modèles 3D exploités dans Google Earth est appuyé par un projet présenté ci-après, au chapitre IV.8.a.a, dont les plans-reliefs sont le sujet. Les maquettes de la collection de Louis XIV suscitent de surcroît l'intérêt de nombreuses communes qui souhaitent valoriser un témoignage d'une époque révolue, à l'image de Marsal (IV.8.a.b), Saint-Omer ou Aire-sur-la-Lys (IV.8.a.c).

IV.8.a.a. Les plans-reliefs virtuels par Google Earth

Dans le cadre de l'exposition La France en relief (18/01 au 17/02/2012) qui a eu lieu sous la nef du Grand Palais à Paris, Google et l'ECPAD⁶³ ont conduit une acquisition tridimensionnelle d'une partie de huit plans-reliefs appartenant à la collection des Invalides. Le Mont-Saint-Michel, Strasbourg, Besançon, Saint-Tropez, Antibes, Berg-op-Zoom, Château Trompette et Toulon (Maison de l'histoire de France, 2012) ont pu être numérisés.

⁶³ Établissement de Communication et de Production Audiovisuelle de la Défense : <http://www.ecpad.fr/>

Initiative de l'Institut Culturel Google menée sous le principe du mécénat de compétence⁶⁴, la numérisation et la reconstruction virtuelle des plans-reliefs ont été rendues possibles par l'intervention d'ingénieurs et de technologies de Google. Néanmoins, pour les plus grands plans-reliefs (Strasbourg et Berg-op-Zoom), les reconstructions ne concernent que des portions réduites de la maquette complète. Enfin, les modèles virtuels, réalisés à la main qui plus est, ont une géométrie simplifiée pour pouvoir être manipulés en ligne sur les plateformes de visualisation cartographique Google Earth (Aloest, 2012). La Figure 38 met en parallèle le Fort Griffon de Besançon tel que reconstruits par Google (b) et le modèle original tel que représenté sur le plan-relief (a). Outre la simplification de la géométrie, on peut remarquer également d'importantes approximations et inexactitudes.



Figure 37. Le Fort Griffon tel qu'il apparaît sur le plan-relief de Besançon (a) et le modèle virtuel réalisé par Google Earth (b). La géométrie et les textures du modèle virtuel présentent de nombreuses incohérences, notamment pour la végétation.

Modèle 3D : Google & Photos : Musée des Plans-reliefs

IV.8.a.b. Restitution vidéo de la place forte de Marsal

Le plan-relief de Marsal fait partie de la collection conservée au Musée des Plans-reliefs à Paris. Une numérisation de cette maquette a été réalisée à l'aide d'un capteur à triangulation⁶⁵ (modèle Vivid de Konica Minolta) dont on peut estimer la précision à environ 1.5 mm. Cette numérisation a permis la création de différentes animations virtuelles faisant partie d'un film⁶⁶ de six minutes et représentant la place forte de Marsal à la suite des dernières interventions de Vauban en 1699. L'objectif ici est bien l'objet représenté et non la maquette qui n'a servi qu'à l'obtention d'une volumétrie schématique sur laquelle la reconstruction géométrique a été conduite *a fortiori* manuellement.

⁶⁴ Mise à disposition gratuite des compétences du personnel d'une entreprise au profit d'un organisme d'intérêt général (<http://www.fondationdefrance.org/>).

⁶⁵ cf. Partie A, chapitre II.2.a.b, page 22

⁶⁶ Le film est disponible à l'adresse : <http://dai.ly/xc4min>



Figure 38. Détail du plan-relief de Marsal (a) et captures vidéo (b et c) du film « Essai de restitution de la place forte de Marsal à l'époque de Vauban ».

Photos : Musée des Plans-reliefs / Christian Carlet ; Film : XYZ et © Art Graphique et Patrimoine

IV.8.a.c. Projet de numérisation des plans-reliefs de Saint-Omer et d'Aire-sur-la-Lys

Suite à la récente exposition au Grand Palais et au projet de numérisation du plan-relief de Toul, de nouveaux projets de création de modèles virtuels de plans-reliefs appartenant à la collection sont lancés. Il s'agit notamment des projets sur les maquettes d'Aire-sur-la-Lys, commencée en mai 2013, et de Saint-Omer, dont le projet devrait être lancé au cours du dernier trimestre 2013 (Figure 39). Les demandes des villes restent encore confuses, car outre la numérisation tridimensionnelle des plans-reliefs, aucune application explicite des données récoltées n'est annoncée (Ville de St Omer, 2013).

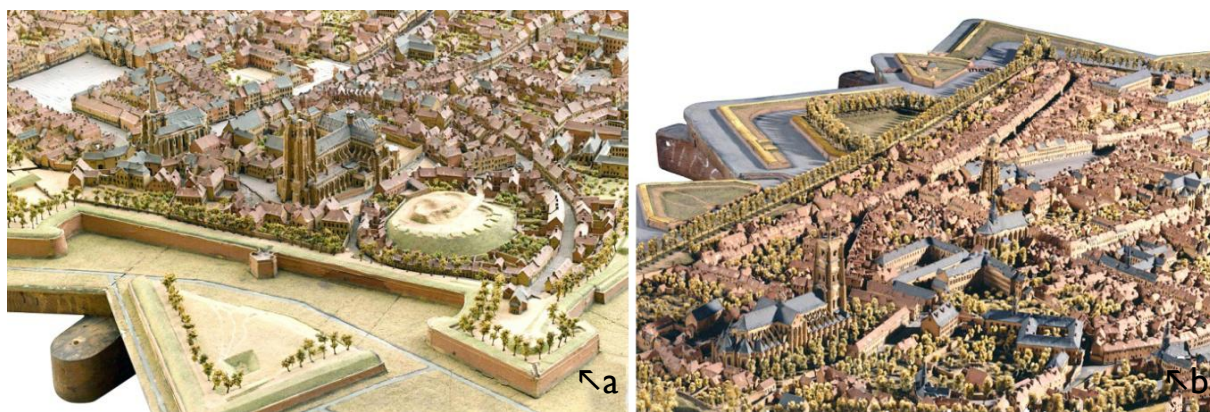


Figure 39. Détails des plans-reliefs de Saint-Omer (a) et d'Aire-sur-la-Lys (b).

Photos : RMN (Musée des Plans-reliefs) / René-Gabriel Ojéda

Un relevé photogrammétrique a notamment été réalisé pour le plan-relief d'Aire-sur-la-Lys par la société Ingeo⁶⁷. En octobre 2013, une animation présentant le modèle virtuel du plan-relief est mise en ligne (Figure 40). On peut remarquer qu'il s'agit d'un maillage texturé d'après photographies présentant encore de nombreuses données parasites liées à la numérisation notamment au niveau des édifices religieux. Des éléments géométriques très fins, tels que les arcs-boutants ou les débords de toiture par exemple, sont confondus avec les corps de bâtiments. Les fortifications bastionnées, visibles en arrière plan sur la Figure 40, semblent pâtir davantage du problème de la restitution des arêtes comme le laisse apercevoir le chemin couvert et son glacis.



Figure 40. Capture photo du film de présentation de la reconstruction virtuelle du plan-relief d'Aire-sur-la-Lys par la société Ingeo.

Film et modèle 3D : Ingeo⁶⁸

⁶⁷ <http://www.ingeo.fr/>

⁶⁸ « Modélisation en 3D du plan-relief d'Aire-sur-la-Lys (62) qui date de 1743. La maquette mesure 27 m². » http://youtu.be/vYMMU_1kGe4

IV.9. Résultats des projets de numérisation de maquettes

Parmi les différents projets s'appuyant sur la numérisation de maquettes, il est possible d'identifier certains critères prépondérants sur les résultats et la conduite des projets, que ceux-ci s'attachent à la création de modèles virtuels de villes ou de maquettes, et qui nous permettent en fin de compte de confronter les différents projets présentés.

IV.9.a. Particularités des maquettes lors de l'acquisition tridimensionnelle

La date de réalisation des maquettes est déterminante, car, plus celle-ci est ancienne, plus elle est susceptible de présenter des dégradations. Des maquettes présentées dans cette étude, les plans-reliefs sont les plus anciennes et donc celles qui ont été les plus soumises aux aléas du temps (guerre, destruction, etc.). Les autres maquettes présentées dans cette étude sont toutes en meilleur état, notamment du fait de dates de réalisation plus tardives.

L'échelle, le niveau de détail et la taille des maquettes sont les principaux facteurs influençant la numérisation. Hormis les maquettes de Rome et de Genève, les maquettes présentent toutes des niveaux de détails extrêmement élevés par rapport à leurs échelles respectives. Cependant, nous pouvons écarter les projets Rome Reborn et Plan de Rome, car ils n'ont pas vocation à reconstruire virtuellement la maquette, mais la ville. En conséquence, la qualité des données brutes de la numérisation et les traitements nécessaires pour une reconstruction fidèle à la maquette ne constituent pas un enjeu de ces projets respectifs. En revanche, ce rapport entre niveau de détail et échelle est parfaitement illustré avec les maquettes d'Hambourg (1/1000) et les plans-reliefs (1/600) qui présentent une grande richesse de détails (présence de fenêtres, cheminées, etc.). Lorsque l'on prend en considération le critère de dimensions des maquettes, on s'aperçoit que les plans-reliefs représentent des surfaces en moyenne deux à trois fois plus grandes que celles d'Hambourg. Ainsi, numériser des détails aussi fins sur des surfaces aussi étendues demeure extrêmement complexe, quelle que soit la technologie de numérisation employée. Pourtant, le projet de numérisation de Prague – sans doute la reconstruction virtuelle de maquette la plus aboutie à ce jour – présente une différence majeure sur ce point avec les autres projets. Car à la différence des autres projets pour lesquels seules des techniques actives ont été employées, la numérisation de la maquette de Prague a été réalisée par photogrammétrie. Cette technique, notamment à travers ses évolutions récentes⁶⁹, suscite de grandes attentes dans le cas des plans-reliefs puisque les caractéristiques physiques sont proches de celles de la maquette de Prague.

En conclusion, les plans-reliefs sont les maquettes les plus anciennes et aussi les plus endommagées. Elles présentent de nombreuses détériorations qui peuvent compliquer un processus d'acquisition tridimensionnelle qui est déjà complexe du fait des caractéristiques géométriques des maquettes présentées dans ce chapitre. Avec les plans-reliefs, ces caractéristiques et notamment le rapport entre échelle, taille et niveau de détails sont poussées à l'extrême. L'acquisition et la qualité de données relevées sont cruciales

⁶⁹ cf. Partie A, chapitre II.3.b, page 26

dans le projet que nous présentons puisque l'objet de notre recherche vise à la création d'une réplique d'une maquette et non de la ville qui y est représentée, comme dans le cas d'autres projets (Rome Reborn, Plan de Rome). Ces maquettes virtuelles ont vocation à devenir des interfaces tridimensionnelles assurant le lien entre une représentation virtuelle fidèle de la maquette et d'autres documents (graphiques, textuels, etc.). Rome Reborn, Hambourg ou les plans-reliefs virtuels par Google utilisent Google Earth comme moyen de médiation tandis que d'autres projets comme Virtual Leodium, Prague ou Genève ont pour objectif de devenir partie intégrante des systèmes d'information géographique existant de chacune de ces villes. Notre projet de reconstruction virtuelle des plans-reliefs et de leurs fortifications s'inscrit dans cette approche visant à la création de système d'information au centre duquel une représentation 3D sert d'interface avec des informations patrimoniales.

IV.9.b. Modélisation 3D des fortifications bastionnées

À l'image des plans-reliefs, et notamment de ceux évoqués dans ce chapitre (Marsal, Aire-sur-la-Lys, Saint-Omer, etc.), d'autres maquettes présentes de vastes zones défensives sous la forme de fortification bastionnée dont les particularités seront présentées dans le Chapitre IV de la partie B. Le *relief Auguste Magnin* (Genève), la maquette de Langweil (Prague) et la maquette d'Hambourg font partie de ces maquettes représentant des villes encore entourées de fortifications bastionnées (XVIIe – XIXe siècles). La modélisation virtuelle de ces ouvrages défensifs revêt un enjeu d'automatisation, car de tels ouvrages sont fréquemment représentés dans le patrimoine formé par les maquettes de villes anciennes et ils peuvent également occuper une surface prépondérante sur la maquette et même en être le sujet comme dans le cas des plans-reliefs. Il est nécessaire de préciser que, malgré une volonté d'automatiser certains processus de reconstruction géométrique dans les projets Rome Reborn, Prague et Hambourg, aucun ne concerne le traitement des fortifications bastionnées pourtant présentes sur plusieurs des maquettes citées ; la recherche d'automatisation se focalisant sur la reconstruction des bâtiments.

Projets et Maquettes	Le projet Plan de Rome	Rome Reborn <i>Plastico di Roma antica</i>	Virtual Leodium <i>La cité de Liège vers 1730</i>	Nantes 1900 <i>Maquette du port de Nantes en 1900</i>	Maquette de Langweil	<i>PRAM Relief Magnin</i>	Maquette d'Hambourg	Plans-reliefs		
1) Caractéristiques de la maquette										
Échelle	1/400	1/250	1/1200	1/450	1/480	1/250 1/200 1/100	1/1000	1/600		
Date de réalisation	1904	1933	1900	1899	1826	1878	1936	min. 1673	moy. 1763	max. 1887
Surface (m ²)	70	278	1,2	17	20	32	~ 8	min. 0,2	moy. 20,2	max. 160
Nombre de parties	102	n.a.	n.a.	16	52	86	n.a.	min. 1	moy. 13	max. 50
Surface par parties (m ²)	0,68	n.a.	n.a.	1	0,38	0,37	n.a.	min. 0,88	moy. 2,52	max. 5,81
Époque de la représentation	IVe s.	IVe s.	1730	Contemporaine à sa réalisation	Contemporaine à sa réalisation	1850	1644	Contemporaine à sa réalisation		
1) Caractéristiques du projet										
Type de projet	Restitution	Evocation	Reconstruction	Reconstruction	Reconstruction	Reconstruction	Reconstruction et restitution	Type de projet		
Production	Recherche	Recherche	Recherche	Recherche	Prestation	Prestation	Recherche			
État du projet	en cours	en cours	en cours	en cours	achevé	en cours	en cours			
Objet étudié	Ville	Ville	Maquette	Maquette	Maquette	Maquette	Maquette			
Technique pour la numérisation	n.a.	Capteurs laser à triangulation et comparaison de phase	Capteur à lumière structurée	Capteur laser à triangulation	SfM/DMVR (terrain) et photogrammétrie manuelle (bâtiments)	Capteur à lumière structurée	Capteur à lumière structurée			
Techniques de reconstruction automatique mises en œuvre pour la géométrie	Aucune (Autodesk 3DS)	Modélisation procédurale de l'architecture ordinaire (City Engine)	Aucune (SketchUp, Autodesk Maya)	n.a.	Segmentation et triangulation du terrain	Aucune	Reconstruction automatique des édifices	Détail dans le Tableau 5		
Origines des textures	génériques	génériques	maquette	n.a.	maquette	génériques	non texturé			
Effectif du projet (personne)	> 40	> 70	n.a.	100	62-110	50	n.a.			
2) Contexte de diffusion										
Système de visualisation	Visites interactives	Google Earth	SIG 3D	Borne interactive	SIG 3D et visites interactives	SIG 3D	Google Earth			
Système de diffusion	Internet	Internet	Internet	Musée	Internet (SIG) et CDs	Internet	Internet			
Public visé	Experts et grand public	Grand public	Experts	Grand public	Experts (SIG) et grand public	Experts	Grand public			

Tableau 4. Caractéristiques comparées de numérisation de maquettes précédemment présentées.

Les données sont toutes issues ou calculées d'après les informations contenues dans les références de ce chapitre.

Projets et Plans-reliefs	Marsal	Google	Aire-sur-la-Lys et Saint-Omer	Toul ⁷⁰
1) Caractéristiques du projet				
Type de projet	Restitution	Reconstruction	Reconstruction	Reconstruction
Production	Prestation	Prestation	Prestation	Recherche
État du projet	Achevé	Achevé	Achevé	En cours
Objet étudié	Ville	Maquette	Maquette	Maquette
Technique pour la numérisation	Capteur laser à triangulation	Photogrammétrie	Photogrammétrie	Capteur laser à triangulation et photogrammétrie
Techniques de reconstruction automatique mises en œuvre pour la géométrie	Aucune	Aucune	Aucune	Rétroconception des bâtiments et des fortifications
Origines des textures	Génériques	Maquette	Maquette	Maquette
Effectif du projet (personne)	n.a.	> 15	n.a.	10
2) Contexte de diffusion				
Système de visualisation	Borne interactive	Google Earth	n.a.	SIG 3D
Système de diffusion	Musée	Internet	n.a.	Internet
Public visé	Grand public	Grand public	n.a.	Experts et grand public

Tableau 5. Caractéristiques comparées de projets de numérisation de plans-reliefs précédemment présentées.
Les données sont toutes issues ou calculées d'après les informations contenues dans les références de ce chapitre.

⁷⁰ cf. Table 1, dite table de ville, et table 4 du plan-relief de Toul. L'ensemble de la maquette est composé de vingt tables représentant une surface totale d'environ 39m² (6,66 x 5,83 m) page 237

Partie B. Reconstruction des fortifications de plans-reliefs

Malgré les progrès dans le domaine de la numérisation tridimensionnelle, aucun des objets issus du patrimoine culturel ne peut être numérisé sans qu'une intervention ultérieure soit nécessaire pour corriger les lacunes du processus d'acquisition. Les maquettes et plus particulièrement, les plans-reliefs de la collection de Louis XIV font partie de ces objets complexes à numériser. Leurs tailles, leur échelle, leur nombre, leurs états de conservation sont quelques-uns des enjeux auxquels tous les projets de relevé tridimensionnel doivent faire face.

L'histoire des plans-reliefs, qui est retracée dans le Chapitre I, est l'occasion de mettre en avant le caractère unique de ces maquettes tant du point de vue patrimonial que dans un projet de numérisation. Les spécificités de l'acquisition tridimensionnelle de plans-reliefs sont ainsi présentées en s'appuyant sur les expérimentations que nous avons pu mener dans le champ de la numérisation de maquettes.

Pour répondre aux enjeux de la numérisation des plans-reliefs, nous présentons une nouvelle approche basée sur les connaissances pour la reconstruction virtuelle de maquettes. Dans le Chapitre II, l'historique du projet de numérisation des plans-reliefs est rappelé avant de restreindre notre propos au cas des fortifications bastionnées présentes sur la plupart des maquettes de la collection. Notre proposition met à profit la connaissance architecturale propre aux fortifications bastionnées pour améliorer le processus de reconstruction virtuelle de ces ouvrages.

Notre approche tire profit des connaissances existantes sur la fortification bastionnée. Regroupées dans des traités d'architecture militaire, les connaissances ne sont pas exploitables en l'état tant la quantité de publications et l'exhaustivité de leurs contenus requièrent un travail d'analyse, de synthèse et de formalisation (Chapitre III).

Le prototype du programme de reconstruction virtuelle des fortifications bastionnées est présenté dans le Chapitre V. Développé sur Grasshopper, il est important de préciser les spécificités de la programmation visuelle avant de consacrer les pages suivantes à l'implémentation, aux expérimentations et à l'évaluation de notre proposition pour la reconstruction virtuelle des fortifications bastionnées des plans-reliefs.

Chapitre I. La collection des plans-reliefs de Louis XIV

Plans en relief à vocation militaire, objets politiques symbolisant la connaissance et le pouvoir du monarque ou de l'empereur sur son territoire, ou témoin de l'histoire urbaine – et en particulier de la fortification – les plans-reliefs présentent le récit de la formation du territoire de la France. Les guerres de siège qui jalonnèrent le règne de Louis XIV mettent en avant le rôle des villes fortifiées qui défendaient la France et leur importance à venir dans l'aménagement du territoire.

Malmenées par les déménagements successifs, les conditions de conservation, handicapées par leurs dimensions ou simplement détruites, de nombreuses maquettes de ces places fortes ont été perdues. Pour la centaine de plans-reliefs épargnée, la conservation et la valorisation de ce patrimoine fragile et démesuré constituent le principal enjeu.

Dans une première partie (I.1), nous allons tout d'abord revenir sur le contexte d'application de nos recherches : les plans-reliefs. L'importance de Vauban, l'histoire de cette collection au cours de ses deux siècles d'évolution et la présentation de ses caractéristiques et des techniques de réalisation qui ont présidé à la création des maquettes, nous permettra de poursuivre sur les enjeux de conservation et de valorisation de ce patrimoine unique à travers une seconde partie (I.2). Les approches numériques permettent de répondre à la plupart des préoccupations soulevées quant à la mise en valeur de la collection même si l'utilisation de ces technologies soulève d'autres questions.

I.1. Les plans-reliefs et les fortifications bastionnées

Dans cette première partie, nous nous attacherons à montrer l'importance du cadre historique qui a favorisé, non seulement l'émergence, mais aussi une abondante production de plans-reliefs (I.1.a). Outils indissociables de la guerre de siège pendant des décennies, les plans-reliefs voient leur vocation évoluer au fil du temps (I.1.b). Les caractéristiques uniques de la collection seront présentées en portant un intérêt particulier sur les maquettes d'exception (I.1.c).

I.1.a. Contexte historique initial et le tracé des frontières

Le premier plan-relief, aujourd'hui disparu, voit le jour sous Louis XIV (1638 – 1715) ; « sa volonté d'hégémonie en Europe l'entraîne, à partir de 1672, dans des guerres quasi continues » (Carpentier, Lebrun, 2000, p. 206). Pour parvenir à cette suprématie, il est nécessaire de repousser et de redessiner les frontières dentelées du Nord et de l'Est pour désenclaver ces territoires et de les renforcer par de puissantes places fortes fortifiées. La confrontation avec la maison de Habsbourg est alors inévitable, car ses possessions s'étendent de l'Espagne au Saint-Empire, encerclant en conséquence le royaume français. Les

guerres contemporaines de Louis XIV et leurs conséquences sur les frontières sont (Faucherre et al., 2007 ; Lynn, 2010) :

- Guerre franco-espagnole (1635 – 1659, traité de Westphalie en 1648 et traité des Pyrénées en 1659).
La frontière est rejetée sur la ligne de crête des Pyrénées avec l'annexion du Roussillon et de l'Artois ;
- Guerre de Dévolution (1667 – 1668, premier traité d'Aix-la-Chapelle).
La frontière nord-est repoussée au-delà de la Somme avec l'annexion de la Somme ;
- Guerre de Hollande (1672 – 1678, traité de Nimègue).
Conservation de la Franche-Comté et annexion du Hainaut ;
- Politique des Réunions (1678 – 1681).
La prise de Strasbourg fait de la rive gauche du Rhin une frontière naturelle ;
- Guerre de la ligue d'Augsbourg (1688 – 1697, traité de Ryswick).
Achèvement du programme de fortification entrepris au début du règne sur une frontière qui se stabilise peu à peu, mais les places avancées du Rhin sont perdues ;
- Guerre de Succession d'Espagne (1701 – 1714, traités d'Utrecht en 1713 et traité de Rastatt en 1714) ;
Perte du Luxembourg, des places des Pays-Bas, des colonies et du Piémont. Annexion de l'Ubaye.

Cette succession de conflits se traduit à l'échelle de l'Europe, et notamment aux frontières françaises, par des gains et des pertes de territoires. Ces régions sont parsemées de villes fortifiées, véritables verrous du territoire et de ses frontières ; enjeux de guerres de siège récurrentes qui font régulièrement changer d'allégeance les villes (Figure 41).

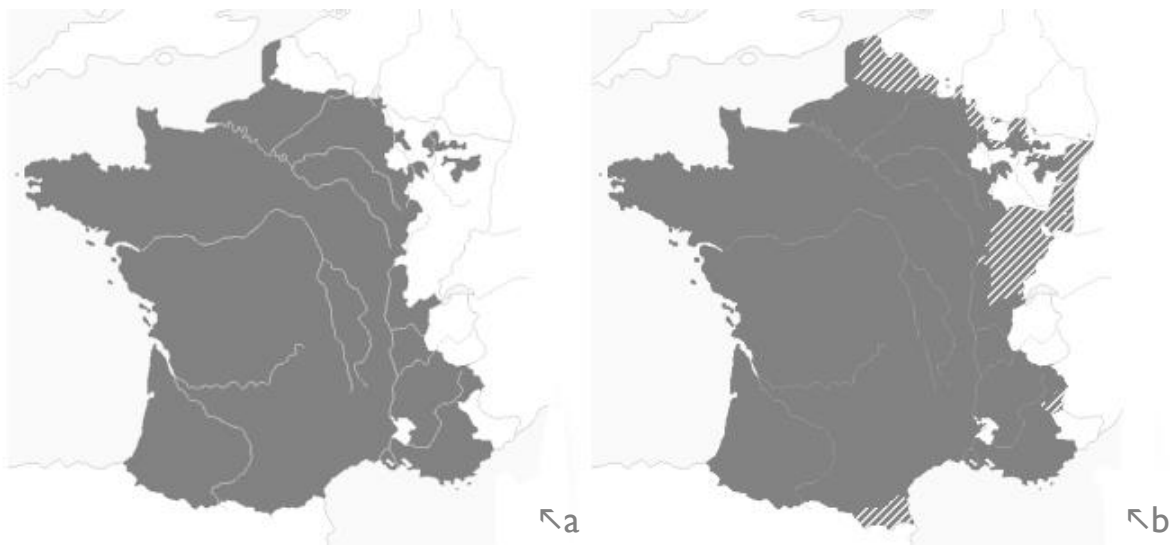


Figure 41. Frontières françaises en 1642 (a) et en 1714 (b). Les hachures représentent les nouveaux territoires.

Les « parties d'échecs » qui ont lieu en Flandre sont significatives ; les places fortes conquises, perdues ou reprises servent à discuter les modalités des traités de paix. C'est ainsi que la France conquiert Audenarde (Flandre, Belgique) :

- en 1658, au cours de la guerre franco-espagnole avant que le traité des Pyrénées de 1659 ne la restitue ;
- en 1667, au cours de la guerre de Dévolution. Défendue victorieusement par Vauban en 1674, la ville doit être restituée selon le traité de Nimègue aux Pays-Bas espagnols en 1678 ;
- en 1684, avant d'être reprise en 1708 lors de la guerre de Succession d'Espagne et ;
- en 1745, avant que la France ne la rende après avoir pris soin de démanteler ses fortifications.

Audenarde est un exemple parmi tant d'autres de ces places convoitées, conquises et à défendre ou perdues et à reconquérir. Dans ce contexte, le plan-relief est donc outil précieux, un « satellite militaire du roi » (Polonovski et al., 2012), capable de montrer ces places lointaines, un jour, françaises, le lendemain, hostiles, mais dont on doit avoir, quelle que soit leur situation, une parfaite connaissance des défenses.

« La collection des plans en reliefs a été la mémoire des frontières constituées par le Roi-Soleil. »

(Faucherre et al., 2007)

Après cette courte description du contexte historique qui a vu l'émergence des premiers plans-reliefs : des outils de visualisation des places fortes frontalières, l'histoire et l'évolution de la collection, notamment du point de vue fonctionnel est présenté.

1.1.b. L'évolution des plans-reliefs et des fortifications

Apogée d'une tradition vieille d'un demi-millénaire, la centaine de plans-reliefs qui a survécu jusqu'à aujourd'hui constitue une collection unique au monde, classée au titre des monuments historiques en 1927. Le premier plan-relief, celui de Pignerol (Piémont, Italie), fut réalisé en 1663 sous le règne de Louis XIV par Alain Manesson Mallet (1630 – 1706), ingénieur militaire et émule de Vauban. L'idée est ensuite reprise par Louvois, ministre de la guerre, dans le but de présenter au roi les places fortes conquises lors de la Guerre de Dévolution (1667 – 1668). C'est ainsi que Dunkerque, devenue française en 1662, est fortifiée par Vauban tandis que son plan-relief est réalisé dès 1668.

« La vie de Vauban (1633 – 1707) correspond à la période d'apogée de la fortification bastionnée. »

(Faucherre et François, 1996)

Vauban (1633 – 1707), qui a obtenu le brevet d'ingénieur ordinaire du roi en 1655 (Virol, 2003) aura jusqu'à la veille de sa mort « dirigé la construction ou la réorganisation de 160 places fortes » (Sailhan, 1991). Le règne de Louis XIV est source d'une intense activité des ingénieurs militaires conduits par

Vauban (Figure 42). De la centaine de maquettes qui nous est parvenue, près d'un quart est réalisé en trente ans, entre 1673 et 1703, alors que Vauban est encore vivant (Figure 42). Après lui, ses « successeurs [...] se contentent de codifier les principes définis par le grand Maréchal ».

« La genèse des collections de plans en reliefs militaires se confond avec celle de la fortification bastionnée »

(Faucherre et al., 2007)

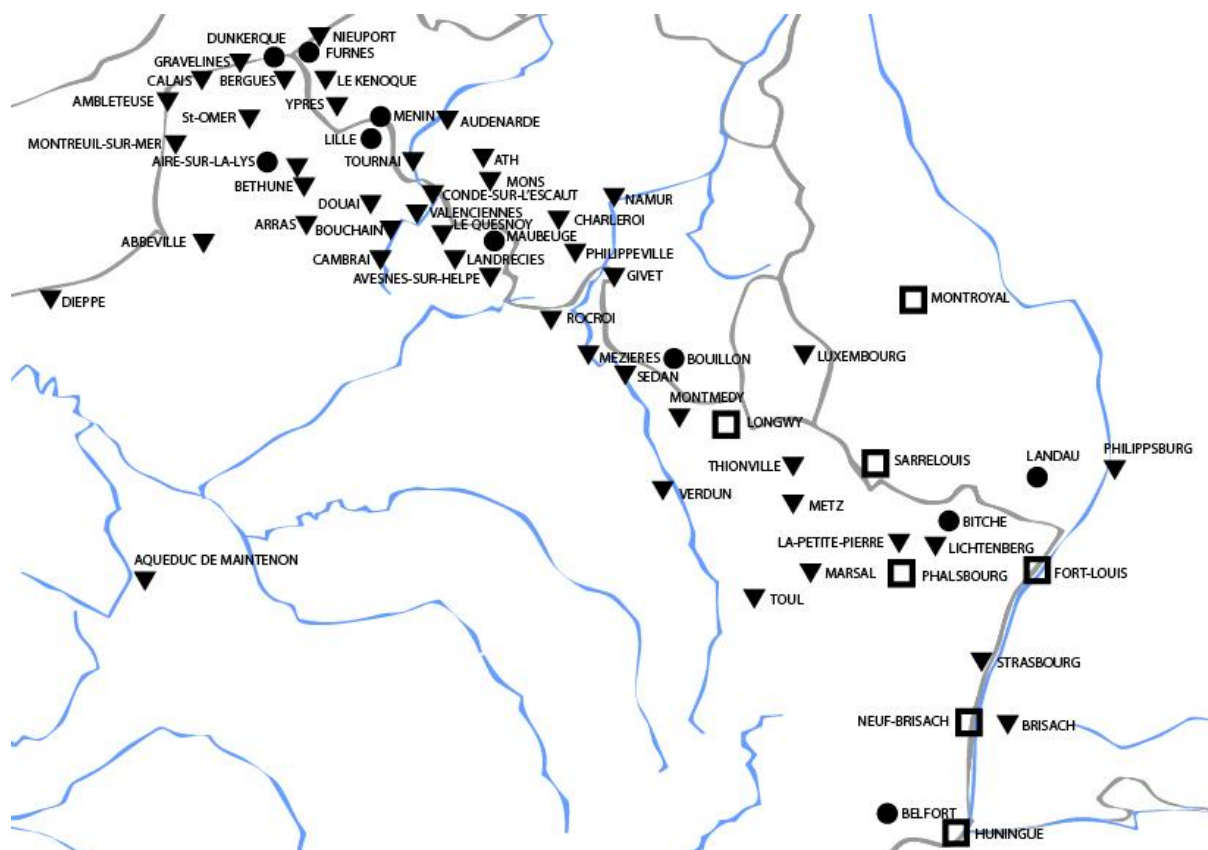


Figure 42. Principales places fortes (□), enceintes ou forts (●) construits ou modifiés (▼) par Vauban à la frontière nord-est (la carte complète est en annexe, page 253).
D'après : Orgeix et al., 2007; Réseau Vauban, 2012

L'émergence des plans-reliefs est ainsi étroitement liée à l'évolution des défenses des villes en général et aux fortifications bastionnées en particulier. C'est au début du XVI^e siècle qu'apparaissent les premières enceintes bastionnées dont les dimensions sont calculées en fonction de la portée des canons et pour réduire les angles morts. L'apparition du glacis et du chemin couvert (Figure 43, A), qui permet de couvrir le glacis, rend les fortifications de plus en plus grandes. Ce dernier point a pu favoriser la mise en œuvre d'un outil de visualisation permettant de rendre compte de l'ensemble du système de fortification d'un site à l'autorité royale.

D'objet didactique, le plan-relief devient peu à peu « objet de prestige » ; il symbolise dès lors la puissance du roi auprès des notables étrangers. Le basculement semble s'opérer lors du transfert de la col-

lection dans la Grande Galerie du Louvre en 1700. Le déménagement qui dura un an endommagea grandement plusieurs maquettes de la collection..

Sous Louis XV (1710 – 1774), la guerre de Succession d'Autriche (1740-1748) et les années qui suivent sont l'occasion pour la collection de s'agrandir avec la réalisation de plans-reliefs des places françaises de Lille (1740), Aire-sur-la-Lys (1743) ou Berg-op-Zoom (1751) ou étrangères telles que Maastricht (1752), Namur (1747 – 1750) ou Audernade (1743). Il s'agit alors de représenter les fortifications nouvellement conquises et d'actualiser les maquettes en remplaçant les plans-reliefs jugés périmés.

En 1754, une grande campagne de restauration de l'ensemble de la collection est lancée. Pourtant, en 1774, on envisage sa destruction pour permettre l'implantation d'un musée de peinture dans la galerie. Déménagées en 1777 dans les combles de l'hôtel des Invalides, les maquettes doivent subir des réparations pendant les vingt années suivantes du fait des dégâts provoqués par le déménagement.

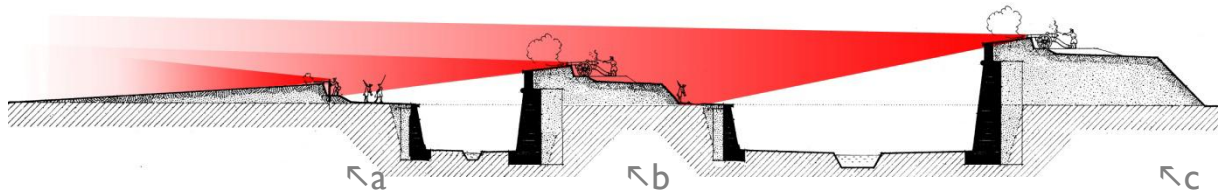


Figure 43. Principe d'étagement des feux : Le glacis et le chemin couvert (A) sont couverts par la demi-lune (B) et par l'enceinte principale (C). Les ouvrages sont ouverts du côté de la ville pour les battre par le feu en cas de prise par l'ennemi.

D'après: Lepage, 2010

Napoléon Ier (1769 – 1821) et ses campagnes permettent à l'Empire de gagner de nouvelles villes. Les maquettes de Luxembourg (1802), Brest (1811) et Cherbourg (1811 – 1813) sont alors construites. Les innovations cartographiques, parmi lesquelles la maîtrise des courbes de niveau permettent d'accroître la qualité d'exécution des plans-reliefs, parachevant l'image d'objet d'art de ces maquettes (Faucherre, François, 1996). Les avancées technologiques en matière d'artillerie et la topographie des sites obligent la fortification à s'éclater sous la forme de forts détachés ou de batteries éloignées ce qui donne naissance aux plans-reliefs les plus grands de la collection, Brest et Cherbourg, qui dépassent les 100 m² (Figure 44).

À la chute de l'Empire, l'armée prussienne s'empare de dix-neuf plans-reliefs. Détériorés lors du transport, certains sont démolis, tandis que les autres sont exposés dans de très mauvaises conditions à Berlin jusqu'en 1944. Seul le plan-relief de Lille réchappe aux bombardements de la Seconde Guerre mondiale tandis que les plans-reliefs de Strasbourg (1725 – 1727), Bitche (1794) et Thionville (aujourd'hui disparu) avaient pu être récupérés dès le début du siècle. Entre temps, on avait procédé aux remplacements des plans-reliefs spoliés avec l'exécution de nouvelles maquettes pour Metz et Strasbourg en 1825 et 1836 respectivement. En 1861, avec l'achèvement du plan-relief de Toul, c'est le dernier représentant de la collection qui est construit (Musées des Plans-Reliefs, 2011).

I.1.c. Caractéristiques de la collection et techniques de construction.

Entre 1663 à 1861, c'est près de deux cent soixante plans-reliefs, des maquettes descriptives, qui ont été construits. Malheureusement, une centaine de maquettes seulement est aujourd'hui conservée. Les plus anciennes, antérieures à 1670, correspondant aux places annexées aux traités des Pyrénées et d'Aix-la-Chapelle, ont été détruites pour faire place à une nouvelle génération de plans-reliefs de meilleure facture avec une échelle fixe de 1 pied pour cent toises⁷¹ (1/600). D'une surface moyenne avoisinant les 20m², la collection présente quelques maquettes exceptionnelles du fait de leurs dimensions telles celles de Brest et Cherbourg (Figure 44).

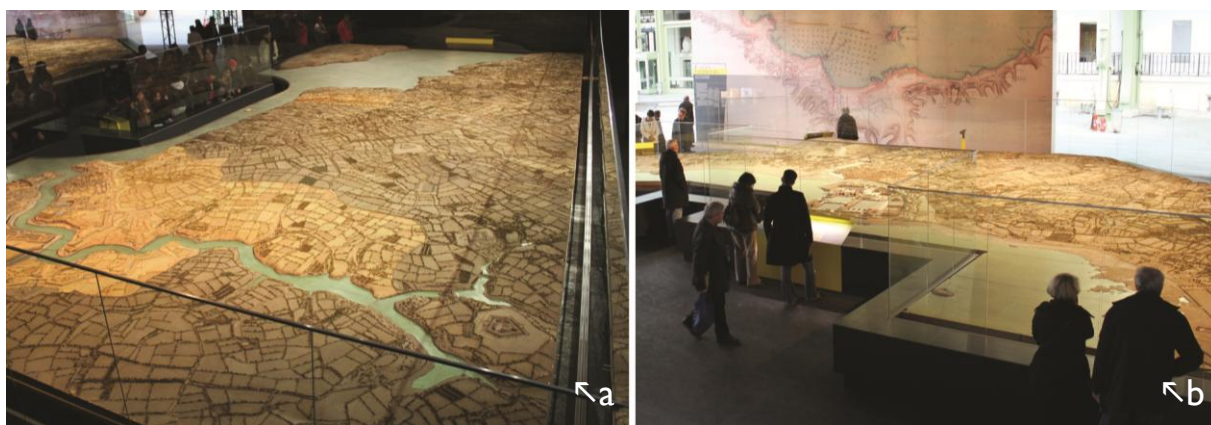


Figure 44. Les plans-reliefs de Brest (a) et de Cherbourg (b), d'une superficie respective de 130m² et de 160m², exposés à la Nef du Grand Palais à Paris en 2012.

Photos : auteur

Avec de telles surfaces, les maquettes ne peuvent être d'un seul tenant (Figure 45). Les deux places fortes citées ci-dessus sont constituées de près d'une cinquantaine de parties, appelées tables, reposant sur des piétements qui leur sont propres. Leurs limites suivent le profil irrégulier d'éléments naturels comme les cours d'eau afin de dissimuler au mieux les jonctions. Les tables, environ au nombre de dix par maquette et d'une surface moyenne de 2,5m², peuvent peser jusqu'à 120 kilogrammes et atteindre trois mètres de haut comme c'est le cas pour celles de Briançon (1731 – 1736). C'est pourquoi il faut au moins une équipe de cinq hommes, travaillant pendant cinq jours pour assembler un plan-relief (Carlet, 2011).



Figure 45. Vue des neuf tables du plan-relief de Besançon (a) et la même maquette de 26,7m² assemblée et exposée au Grand Palais (b).

Photo : RMN (Musée des Plans-reliefs) / René-Gabriel Ojéda RMNGP

⁷¹ Unité de mesure valant six pieds, soit un peu moins de deux mètres (1,949 m à Paris).

Après que des ingénieurs topographes procèdent au relevé in situ, des documents préparatoires sont produits pour l'étape de réalisation de la maquette : ce sont des épures, des cahiers de développement et des plans des tables composant le plan-relief sur lesquels figurent constructions, éléments paysagers et courbes de niveau, où sont représentées les élévations de toutes les constructions pour lesquelles on a pris soin de préciser les matériaux utilisés (Figure 46).

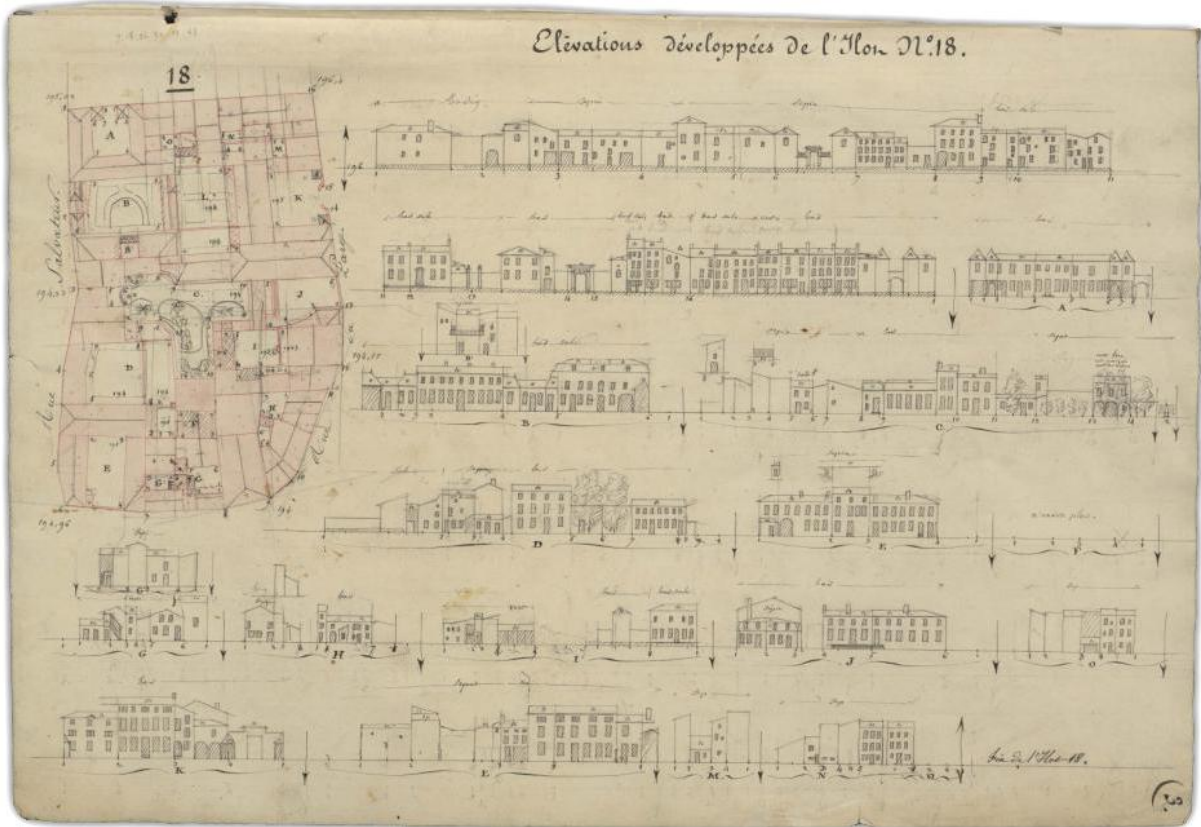


Figure 46. Extraits du cahier de développement D du plan-relief de Toul représentant les élévations développées et le plan de l'îlot 18.

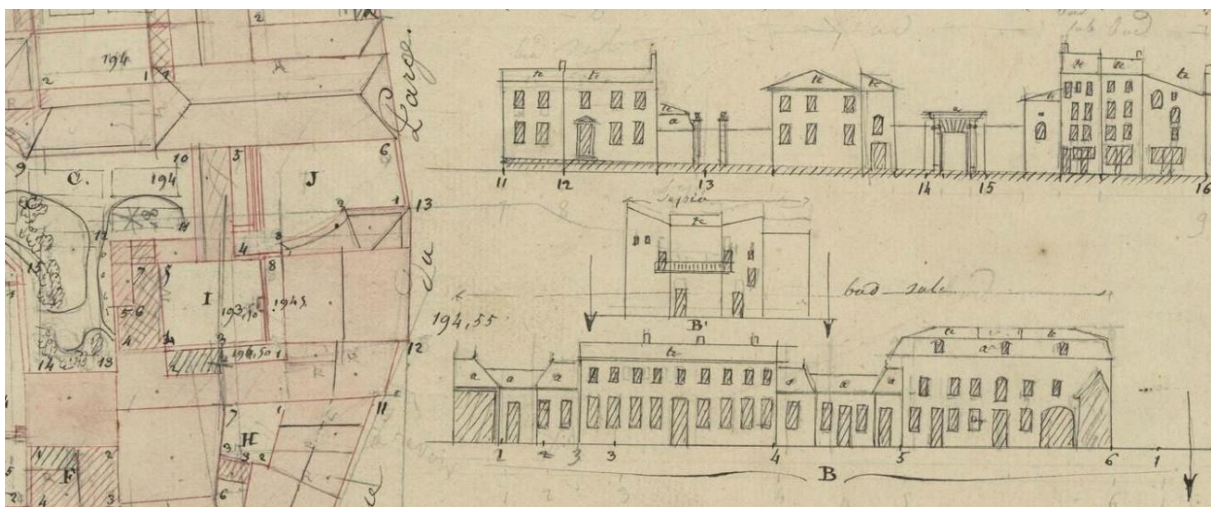


Figure 47. Détail de l'extrait du cahier de développement D du plan-relief de Toul représentant les élévations développées et le plan de l'îlot 18

Photos : Musée des Plans-reliefs

Les différents corps de métiers (ébénistes, décorateurs, etc.) vont ensuite se succéder afin de réaliser les centaines de maisons et centaines de milliers d'arbres, de pieds de vigne et de haies nécessaires à la réalisation des plans-reliefs. Les matériaux utilisés pour la réalisation des plans-reliefs sont fragiles et les conditions dans lesquelles les maquettes ont été conservées ne les ont pas épargnées. Les bâtiments sont constitués de blocs de tilleuls taillés et recouverts de papiers gravés ou peints selon les textures. Les ouvertures étaient découpées à l'emporte-pièce puis apposées, tout comme les cheminées. La topographie était restituée grâce à l'utilisation de carton mâché tandis que leurs textures étaient obtenues soit par saupoudrage de sable fin sur un lit de colle soit par pulvérisation de soies teintées et hachées pour les champs et les prairies. Enfin, de fines chenilles de soie entrelacées avec un fil de laiton permettaient de décliner de nombreux types d'arbres. « Les tables étaient ensuite assemblées entre elles, à la manière d'un puzzle, au moyen d'un ensemble de barres jointes par tenons et mortaises, et reposaient sur un piétement de bois spécialement conçu pour chaque maquette (Musées des Plans-Reliefs, 2011). »

Conservées depuis 1777 dans les combles de l'hôtel des Invalides à Paris, certaines maquettes ont souffert de la poussière, de la lumière et de l'humidité. En 1994, l'une des dernières opérations de restauration a lieu, on procède au recollage et au nettoyage au laser pour désincruster la poussière de la soie et ainsi raviver les couleurs. Seuls 28 plans-reliefs ont bénéficié de ce traitement pérennisé par leur placement dans une vitrine climatisée avec un éclairage contrôlé. Il s'agit des places fortes des littoraux français et de la frontière pyrénéenne. Avec le départ en retraite de Christian Calet en 2010, l'atelier de restauration du Musée des Plans-Reliefs est privé de son dernier restaurateur. En 2012, dans le cadre de l'exposition « La France en relief », une partie des seize maquettes exposées ont néanmoins pu être restaurées.

1.2. La collection aujourd'hui

De la centaine de plans-reliefs conservés, un peu moins de la moitié est exposée. Vingt-huit le sont à l'hôtel des Invalides à Paris tandis que quinze autres sont présentés au Palais des Beaux-Arts de Lille (2007). L'exposition temporaire qui eut lieu dans la Nef du Grand Palais a permis d'exposer seize maquettes pour moitié des places fortes alpines. Malgré le succès de ce genre de manifestations sporadiques qui permettent de mettre en avant des plans-reliefs rarement exposés, la collection, victime de sa démesure et de sa fragilité, est confrontée à la triple interrogation de la préservation, de la valorisation et de la diffusion de ce témoignage unique de l'histoire de la France, de ses frontières, de ses villes et de ses campagnes.

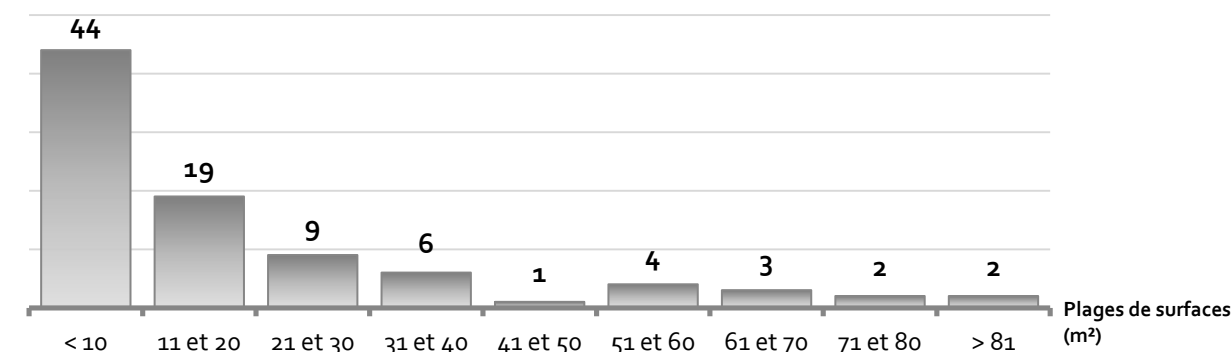


Figure 48. Nombre de plans-reliefs par plage de surface (m²)

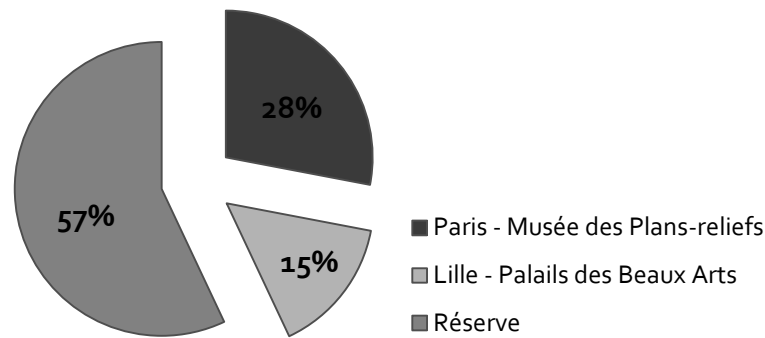


Figure 49. Répartition de la collection des plans-reliefs

Le ministère de la Culture et de la Communication, dans son périodique « Culture et Recherche », avance un certain nombre de réponses à ces questions :

« La numérisation et l'accessibilité en ligne des contenus culturels sont essentielles à la valorisation du patrimoine, au dynamisme de la création de contenus et à l'émergence de nouveaux services en ligne. Elles contribuent à la démocratisation de l'accès à la culture, au développement de la société de l'information et de l'économie de la connaissance. »

(Mission de la recherche et de la technologie, 2008)

Comme il a été établi dans la première partie, au chapitre I.1.a, la numérisation du patrimoine culturel est le moyen de répondre à plusieurs enjeux qui concernent tout particulièrement la collection des plans-reliefs. La constitution d'une archive numérique de ces maquettes permet d'enrichir les ressources documentaires existantes sur les plans-reliefs. Ainsi, aux archives photographiques⁷² de la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, peuvent ainsi s'ajouter des documents tridimensionnels qui permettent de compléter la sauvegarde du patrimoine et une meilleure appréhension de l'œuvre originale.

La diffusion et la valorisation du patrimoine constituent en effet un axe d'investissement majeur pour ses différents acteurs. Les technologies de l'information et de la communication permettent la création de systèmes d'information au centre duquel se trouve une représentation tridimensionnelle de l'objet étudié. La maquette numérisée devient ainsi une interface sous la forme d'une représentation tridimensionnelle avec d'autres documents multimédias. Mais comme nous le précisons déjà au chapitre I.1.a de la partie A, de nombreux verrous techniques sont à lever pour parvenir à de tels systèmes par rapport à la variété des objets patrimoniaux. L'acquisition de données tridimensionnelle n'est qu'une première étape dans ce processus. Le traitement de données par rétroconception telle que nous l'avons défini au Chapitre III, et plus particulièrement au point III.6, permet de transformer les données de l'acquisition en modèles 3D enrichis conformes aux exigences de systèmes d'information visant à la diffusion et à la valorisation du patrimoine culturel. L'approche que nous proposons dans le chapitre suivant s'inscrit dans cette volonté de faire de données 3D brutes un modèle 3D enrichi sémantiquement.

⁷² http://www.mediathèque-patrimoine.culture.gouv.fr/fr/archives_photo/index.html

Chapitre II. Proposition d'une approche basée sur les connaissances pour la reconstruction des plans-reliefs : le cas des fortifications bastionnées

Pour répondre aux enjeux de la numérisation du patrimoine et en particulier des plans-reliefs (optimisation, correction de la géométrie, enrichissement sémantique, etc.), nous proposons une approche basée sur les connaissances pour la reconstruction virtuelle des plans-reliefs : KASToR (*Knowledge based Approach : from Scale Model To 3D Replica*), avec comme cas d'application les fortifications bastionnées. Le projet de numérisation des plans-reliefs fait actuellement l'objet de deux recherches menées conjointement au MAP-CRAI. La première, lancée en 2010, porte sur l'automatisation de la reconstruction virtuelle des bâtiments présents sur les maquettes (Chevrier et al., 2010). Confortée par les résultats de l'approche mise en œuvre dans cette première recherche (II.1), une seconde étude a été entreprise sur un élément emblématique des plans-reliefs : les fortifications bastionnées (II.2).

II.1. Automatisation de la reconstruction paramétrique des bâtiments présents sur les plans-reliefs

L'approche originelle (Jacquot, 2010) pour la reconstruction des bâtiments présents sur les plans-reliefs consistait à extraire manuellement, par photogrammétrie, les segments correspondants aux arêtes de toitures avant de les isoler par toits. Le processus était ensuite automatique. La classification des segments (en rive, rive de tête, faîtage, etc.) permettait de modéliser – grâce aux relations particulières entre arêtes – les surfaces formées (pan, terrasson, brisis, etc.) et d'appliquer certaines contraintes (planéité des pans, parallélisme de segments, etc.) pour corriger les erreurs héritées de l'acquisition par photogrammétrie. On identifiait ainsi automatiquement les différents types de pans de toiture des bâtiments. Dans les derniers développements de 2013, le recours à des outils photogrammétriques SfM⁷³ permet d'obtenir pour chaque îlot de la maquette un maillage texturé dont on extrait automatiquement les faces composant les différents pans des toitures. Leurs configurations uniques permettent de déterminer la typologie de la toiture parmi des modèles établis et d'y associer une instance de bâtiment paramétrique dont les valeurs des paramètres sont automatiquement calculées pour correspondre aux données relevées.

L'apport de contraintes architecturales dans la reconstruction des bâtiments a démontré l'efficacité d'une modélisation basée sur les connaissances d'une partie des plans-reliefs. Depuis plusieurs années, le MAP-CRAI mène des recherches sur la génération de composants architecturaux paramétrés (Chevrier, Perrin, 2009). À partir des connaissances théoriques telles que celles figurant dans les traités d'architecture classique, on peut décrire l'architecture et ses composants en un ensemble d'objets et de paramètres. On peut, par la suite adapter chaque objet à une référence en faisant varier la valeur des paramètres définis.

⁷³ cf. Partie A, chapitre II.3.b, page 37

L'existence de traités de fortification bastionnée et les précédents projets du MAP-CRAI qui mettaient à profit les traités d'architecture classique pour l'élaboration de bibliothèques d'objets architecturaux paramétriques nous ont amenés ainsi à nous intéresser à l'automatisation de la reconstruction virtuelle des parties fortifiées des maquettes.

II.2. Introduction à la rétroconception des fortifications des plans-reliefs

La reconstruction des fortifications des plans-reliefs suit une approche dans laquelle on a également recours à des connaissances *a priori* sur l'objet de l'étude (Figure 53). Mais pour conduire une rétroconception des fortifications telle que définie dans le Chapitre III de la partie A, deux opérations sont tout d'abord nécessaire : l'acquisition des données initiales et la création d'un maillage. Le résultat de ces opérations dépend de nombreux facteurs dont certains ont pu être identifiés lors de l'étude de projets de numérisation de maquettes (Partie A, chapitre IV.9). Seulement après avoir minimisé l'impact de ces facteurs est-il possible de procéder aux opérations manuelles ou automatiques de reconstruction et d'ajustements géométriques à des données existantes. Les cinq points suivants décrivent de manière synthétique les différentes étapes de l'approche que nous proposons.

a) Acquisition tridimensionnelle des plans-reliefs (Figure 53, 1).

Présentée dans le Chapitre III, cette première étape a pour objectif l'acquisition de données tridimensionnelles à partir de plans-reliefs et la création de maillages pour chacune des maquettes numérisées. Étant donné les problèmes d'accès aux plans-reliefs, l'obtention de tels relevés constitue la première difficulté dans le projet de numérisation de telles maquettes. Afin de disposer d'un échantillon de données brutes sur lequel tester notre approche, différentes méthodes d'acquisition ont été mises en œuvre. Il a été également possible d'utiliser des données acquises par d'autres acteurs impliqués dans des projets de valorisation du patrimoine et qui ont pu avoir accès à des plans-reliefs pour en effectuer des relevés tridimensionnels (Figure 50). En conséquence, les données auxquelles nous avons accès ne sont pas nécessairement de même qualité notamment sur la régularité de la densité de points.

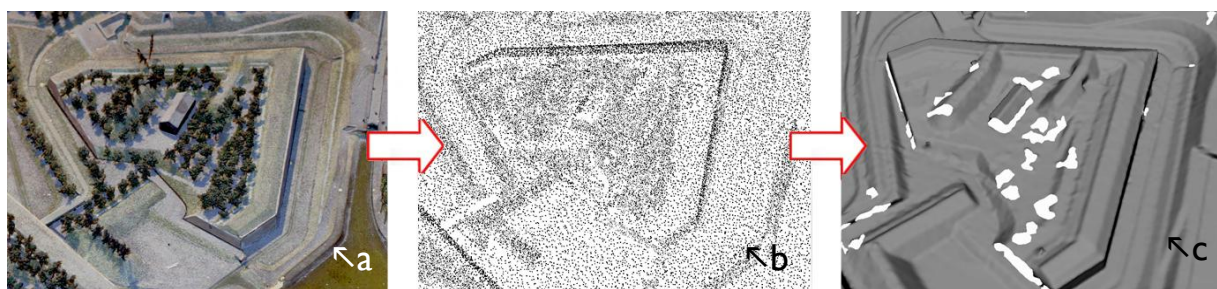


Figure 50. Chaque plan-relief sur lequel a été expérimentée notre proposition a fait l'objet d'une numérisation (a) selon des techniques différentes, mais qui résultent toutes en l'obtention de nuages de points (b) qui permettent d'obtenir des maillages (c).

Mais ces données ne sont pas suffisantes pour permettre une modélisation des fortifications bastionnées, car elles sont incomplètes, imprécises et dépourvues de sémantique. C'est pourquoi il est nécessaire de recourir à une modélisation des connaissances en fortification bastionnée qui permet la création

d'une bibliothèque d'objets paramétriques qui seront adaptés et substitués aux données de l'acquisition. Pour parvenir à un modèle de connaissance, nous nous appuyons sur des publications qui rendent compte de la science de la fortification.

b) Sélection et étude d'un corpus restreint de traités d'architecture militaire (Figure 53, 2).

Cette seconde étape, présentée dans le Chapitre IV, consiste en la sélection et l'analyse d'un échantillon d'ouvrages théoriques pertinents sur la fortification bastionnée en vue de la création d'un modèle de connaissance, une ontologie, identifiant les différents concepts de cette discipline et précisant leurs relations. Car la fortification bastionnée est un ensemble d'ouvrages répondant à des fonctions défensives dont les dimensions et les positions sont calculées afin de tenir en échec un siège et tout au long des 250 ans du développement de cette architecture militaire, ces systèmes défensifs et leurs tracés régulateurs n'ont de cesse de s'adapter aux progrès de l'artillerie qu'on leur oppose. Par conséquent, le nombre de systèmes et d'ouvrages inventés est conséquent, comme l'illustre notamment le nombre de publications sur cette discipline. La géométrie de chacun des objets composant les fortifications y est précisément décrite par des règles de constructions. Une étude est donc nécessaire pour sélectionner les traités de fortification les plus pertinents à la réalisation d'un modèle de connaissance adapté à notre projet. 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. La construction d'une 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 ce domaine, expliciter ce qui est considéré comme implicite sur ce domaine, etc.

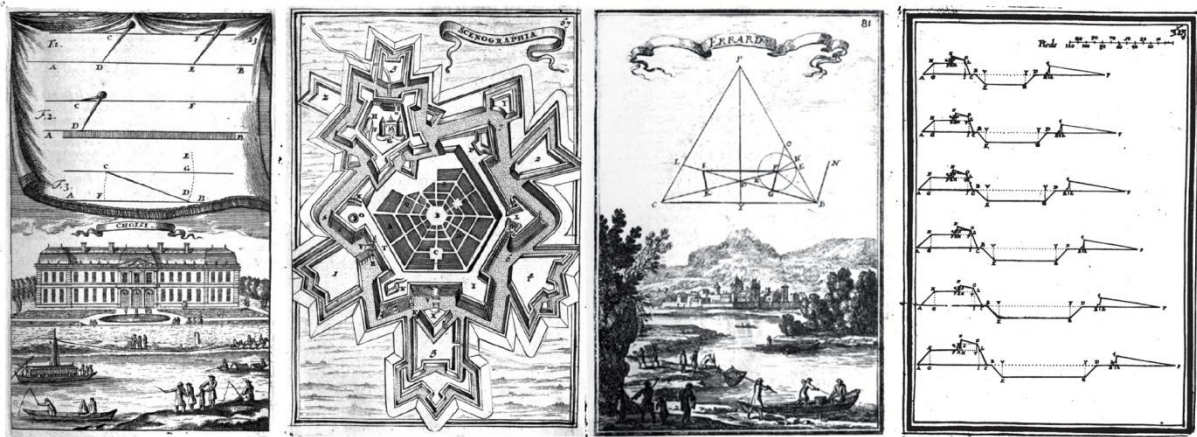


Figure 51. Quelques planches du traité d'Allain Manesson Mallet illustrant l'importance de la géométrie, de la nomenclature et des règles de construction des ouvrages de fortifications en plan et en coupe. La troisième planche montre le dessin du front bastionné de l'enceinte.

D'après : Manesson Mallet, 1696

Après avoir dégagé un premier corpus de traités sur des critères historiques (les traités fondateurs et les rapporteurs/successeurs de Vauban), les premières analyses de ces traités viennent corroborer les hypothèses faites sur l'importance de la géométrie dans la création des ouvrages de fortification bastionnée. Formant l'ossature de la fortification bastionnée, des tracés régulateurs propres à chaque ouvrage permettent la construction de vastes systèmes défensifs. Parmi ces tracés, le premier à prendre en considération est

celui du front, 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). Il en ressort que la fortification bastionnée est un ensemble d'ouvrages ou d'obstacles dont la position et les dimensions sont déterminées par des contraintes défensives (portée de l'artillerie, angles morts, etc.). Chacun de ces ouvrages peut être généralement interprété comme la combinaison d'un tracé polygonal (ou magistrale) et d'un profil de front (Figure 52). Ces ouvrages peuvent être ensuite complétés par différents éléments (embrasure, traverse, etc.). Les règles de construction pour chacun des ouvrages concernés sont explicitées dans le modèle de connaissance établi pour l'élaboration de différents algorithmes de création d'ouvrages paramétrés de fortification bastionnée.

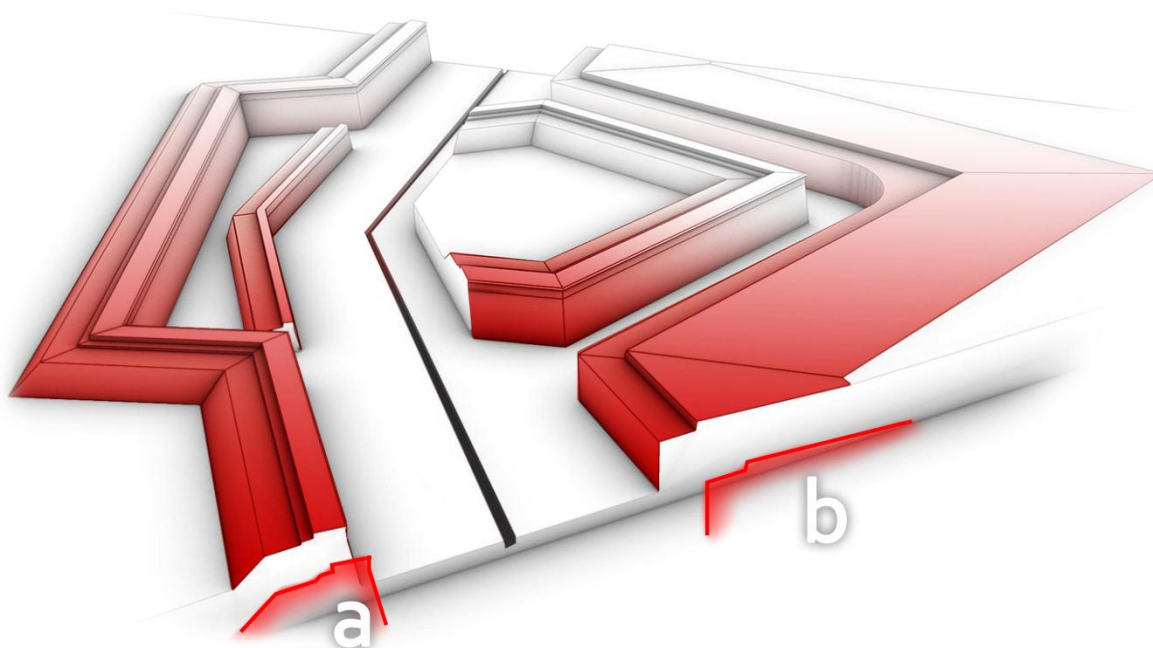


Figure 52. La plupart des différents ouvrages de fortification bastionnée peuvent être construits par le balayage d'un profil le long d'une trajectoire à l'image du front (a) ou du chemin couvert et du glacis (b).

c) Implémentation des algorithmes et reconstruction géométrique des trajectoires (Figure 53, 3).

La rétroconception des plans-reliefs numérisés (Figure 53, 1) que nous proposons au Chapitre V, utilise l'ontologie de fortification bastionnée (Figure 53, 2) pour permettre l'implémentation de différents algorithmes de reconstruction géométrique. Les spécificités de la programmation sur Grasshopper et le choix de ce langage sont tout d'abord précisés dans la partie V.1 avant que l'on ne présente la bibliothèque d'objets paramétriques V.2. Cette bibliothèque permet la création et l'ajustement des trajectoires des différents ouvrages de fortification bastionnée (Figure 53, a et b) à des données existantes. La nécessité d'automatisation de ce processus va par la suite permettre l'implémentation d'algorithmes de segmentation sémantique (Figure 53, c).

1 Création manuelle de trajectoires théoriques (Figure 53, a).

Cette étape, développée dans le chapitre V.2.a, précise les différents algorithmes de création de trajectoire d'ouvrages de fortification bastionnée nécessaire à la création des trajectoires théoriques. L'ontologie nous a en effet permis d'identifier et de modéliser les connaissances à l'origine des tracés de nombreux ouvrages dont la construction repose sur une opération géométrique de balayage d'un profil le long d'une trajectoire. Après avoir identifié les typologies des différents ouvrages à trajectoire présents sur les plans-reliefs étudiés, des algorithmes de création de trajectoire théorique ont été définis pour chacun d'entre eux et selon les méthodes de plusieurs ingénieurs militaires avant d'être implémentés dans Grasshopper. Les composants résultants sont ensuite utilisés pour reconstruire les trajectoires réelles.

Les paramètres de ces composants sont cependant limités aux variables établies par la théorie. Pour les trajectoires des fronts, il s'agit des deux points formant les extrémités de la trajectoire de l'ouvrage et du nombre de fronts contigus à celui qui est créé. Pour le chemin couvert et la tenaille, le seul paramètre utilisé est le tracé d'un précédent front. Pour la demi-lune, le tracé du front et de l'escarpe sont les deux paramètres nécessaires au tracé de sa trajectoire tandis que l'ouvrage à corne devant un bastion nécessite comme paramètre les trajectoires des deux fronts, des deux escarpes et des deux demi-lunes devant lesquels il se situe.

2 Ajustement des ouvrages précédents à des données existantes (Figure 53, b).

Cette étape, présentée dans le chapitre V.3, a pour objectif la création de composants Grasshopper permettant d'ajuster manuellement les trajectoires théoriques précédemment créées sur les relevés tridimensionnels (Figure 53, 1). Pour chacun des ouvrages dont on a implémenté la trajectoire théorique, un composant d'ajustement spécifique est donc créé. Les ajustements sont requis pour faire correspondre une trajectoire paramétrique théorique à une trajectoire réelle présente dans le maillage issu de l'acquisition tridimensionnelle.

Ce chapitre explore enfin les différents choix quant aux paramètres d'ajustement. Les règles de construction étant différentes d'un ingénieur à un autre, les paramètres théoriques pour un même ouvrage sont alors différents. Les entités géométriques manipulées dans les traités de fortification peuvent aussi être peu adaptées pour la phase d'ajustement manuel. Le choix de paramètres est donc déterminant pour permettre la reconstruction des trajectoires de manière précise et efficace.

3 Extraction automatique des données nécessaires à la reconstruction des ouvrages de fortification (Figure 53, c).

Cette dernière étape, exposée dans le chapitre V.4, rend compte des processus nécessaires à l'extraction et à la reconstruction automatique des trajectoires des différents ouvrages à trajectoires cités précédemment. Cette sixième étape permet d'automatiser la phase d'ajustement en limitant l'intervention humaine à la sélection des points initiaux formant les extrémités des différents fronts présents sur les mailages.

Ainsi, alors que dans le premier temps du projet, la reconstruction géométrique des ouvrages était effectuée manuellement, uniquement à l'aide des composants décrits dans les deux étapes précédentes, cette sixième étape vise à automatiser la génération des trajectoires en extrayant directement des données brutes la géométrie nécessaire à la reconstruction des ouvrages. Pour ce faire, une segmentation des mailages issus des relevés tridimensionnels est nécessaire. Différentes solutions ont été explorées avec des expérimentations menées sur des programmes commerciaux. Bien que la segmentation n'est que géométrique, de nombreuses interventions manuelles sont tout de même nécessaires pour obtenir des résultats satisfaisants. Aussi, des algorithmes de segmentation et de reconstruction ont été définis et implémentés sur Grasshopper pour permettre la rétroconception des trajectoires des différents ouvrages de fortification bastionnée. Les composants de génération de trajectoires théoriques évoqués précédemment (Figure 53, a) ne sont pas rendus obsolètes, mais, au contraire, sont au cœur du processus de rétroconception. Ils apportent les contraintes métiers nécessaires aux algorithmes de segmentation sémantique pour identifier la géométrie pertinente avant qu'une opération de reconstruction automatique des trajectoires des ouvrages ne soit effectuée. Les composants d'ajustement sont également encore présents (Figure 53, b) et laissent la possibilité d'effectuer d'ultimes ajustements manuels sur les trajectoires des ouvrages.

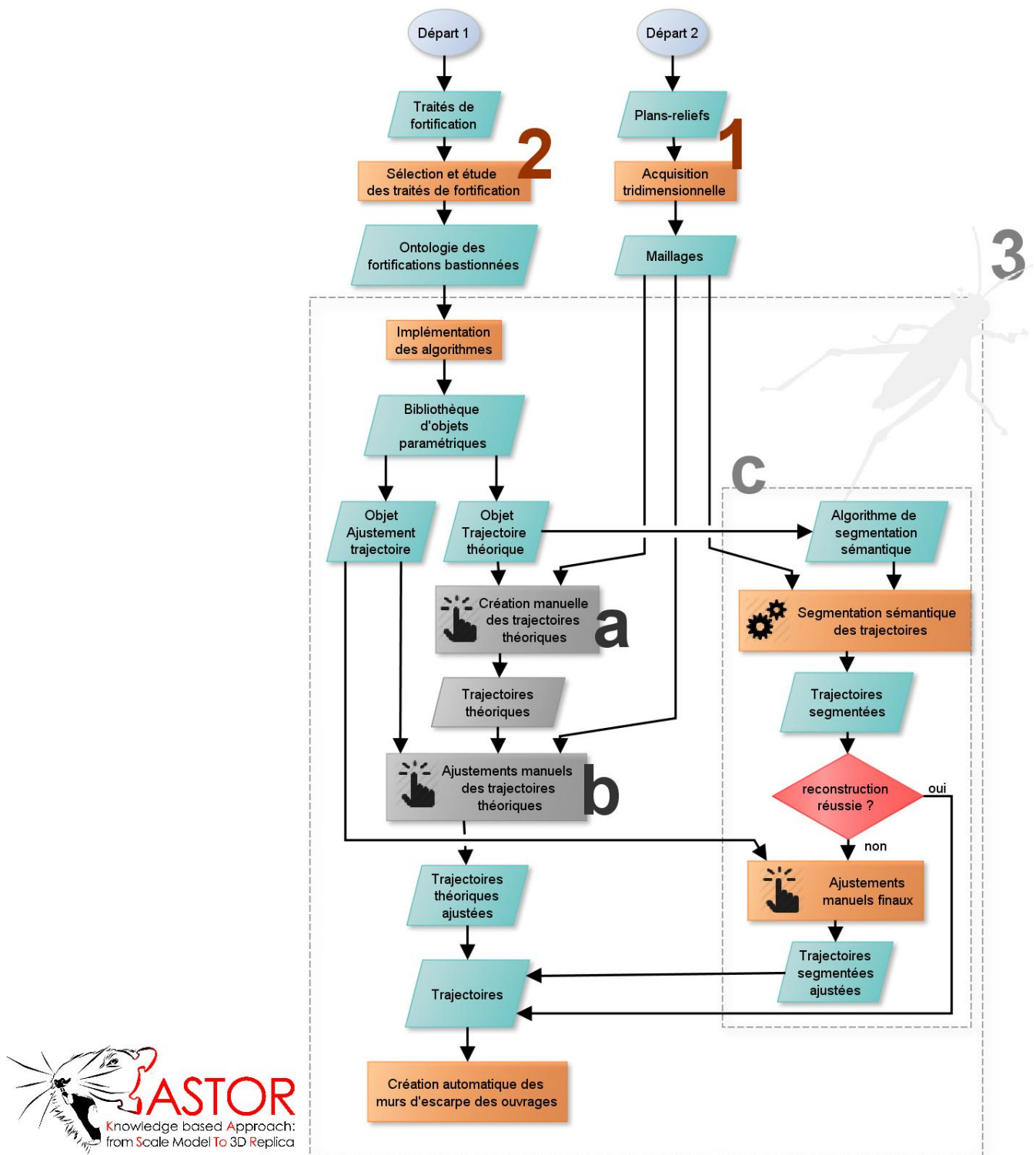


Figure 53. Principales étapes de l'approche KASToR. À partir de l'acquisition tridimensionnelle (1), et de l'ontologie qui a été établie grâce à l'étude des traités de fortification (2), il est possible de reconstruire les différentes trajectoires supports des opérations géométriques de balayage à l'origine de la plupart des ouvrages de fortification. L'implémentation des différents algorithmes de reconstruction et les expérimentations prennent place sur Grasshopper (3). Dans un premier temps manuelle (a et b), la reconstruction des trajectoires est ensuite assurée automatiquement par le biais d'opérations de segmentation sémantique (c). Ces dernières opérations sont développées dans la partie V.4.b : Segmentation sémantique des trajectoires des ouvrages, page 173.

Chapitre III. Acquisition tridimensionnelle de plans-reliefs

Au cours des deux siècles qui ont vu la collection de plans-reliefs s'enrichir de plus de 200 maquettes de places fortifiées, la fonction de ces objets a beaucoup évolué. Ainsi, aujourd'hui, les maquettes de la collection sont les témoins des progrès techniques et d'une recherche d'une plus grande précision dans la représentation du territoire et donc, dans la volonté de le maîtriser. Mais ce sont aussi les témoins de l'histoire du pays, de ses villes fortifiées et de ses frontières. Ce lien avec l'identité du pays est prégnant comme en témoignent deux événements récents : le déménagement de la collection à Lille sous l'impulsion de son maire devenu premier ministre en 1986 (Montard, 2012) et le choix de la Maison de l'histoire de France, de faire, pour sa première manifestation en 2012, une grande exposition tenue au Grand Palais et intitulée la France en relief.

Cependant, la rareté de ces événements démontre encore une fois l'étendue des contraintes logistiques et des problèmes de protection de la collection des plans-reliefs. Numériser les plans-reliefs permet de répondre en partie à ces enjeux, mais les outils mis en œuvre pour une telle opération sont sujets à de nombreuses contraintes que nous présentons dans la partie suivante (III.1).

III.1. Facteurs influents l'acquisition tridimensionnelle des plans-reliefs

En 2010, alors que le projet de numérisation du plan-relief de Toul est lancé, la numérisation des plans-reliefs est une opération inédite. Fort de l'expérience acquise par le CRAI sur la numérisation de sculptures, les premières sessions de numérisation ont été menées avec la même technique, un capteur laser à main basé sur le principe de la triangulation. En sculpture, les reliefs (bas-reliefs et hauts-reliefs) présentent des caractéristiques proches des plans-reliefs, notamment pour les problèmes de masques et d'occlusions (Figure 54). Mais à la différence de ces derniers, les maquettes d'architecture représentent en grande partie des constructions humaines, caractérisées par des formes géométriques anguleuses, que les techniques de numérisation peinent à acquérir.



Figure 54. Les bas-reliefs, comme le bas-relief (18 mètres x 3,50 mètres) du pilier Ouest de l'Arc de Triomphe de l'Étoile à Paris, présentent des caractéristiques proches des plans-reliefs quant à leur numérisation : occlusions, masques, etc.
 Photo : La bataille d'Austerlitz sculptée par Jean-François-Théodore Gechter, entre 1833 et 1836. Creative Commons

Première pierre du processus de modélisation, l'acquisition est rendue possible grâce à une grande variété d'outils dont le choix dépend de l'application qui sera faite du modèle, mais surtout des caractéristiques mêmes de l'objet initial telle que la forme, la taille, les matériaux, le niveau de détails, son environnement, etc. comme nous l'avons déjà établi dans le Chapitre II.4. L'étude de projets de numérisation de maquettes présentée dans le Chapitre IV nous a permis également de déterminer certains des facteurs influençant la numérisation. Notre expérience sur l'acquisition tridimensionnelle des plans-reliefs nous permet de les compléter et de les structurer en trois points :

1. Facteurs géométriques des plans-reliefs.

Les plans-reliefs sont des modèles réduits présentant un niveau de détail élevé par rapport à leur échelle. Fractionnées en tables, ces maquettes forment un ensemble pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres carrés. Or, comme nous l'avons établi dans la première partie, au chapitre II.4, aucun dispositif d'acquisition n'est capable de numériser – en un laps de temps court – des objets à la fois de grandes dimensions, mais présentant un niveau de détail élevé. Le niveau de détail pose également des problèmes proches de ceux rencontrés en macrophotographie. Pour relever précisément les plans-reliefs par photogrammétrie, il est nécessaire d'être au plus près de l'objet étudié, ce qui par conséquent se traduit par une profondeur de champ courte et une zone de netteté des photographies très restreinte (Figure 55).

Alors que les parties urbaines sont peu végétalisées, les fortifications bastionnées sont souvent recouvertes de haies qui agissent comme des masques lors de la numérisation et qui provoquent un phénomène d'occlusion.

2. Facteurs matériels des plans-reliefs.

À ces considérations géométriques, il faut ajouter que les matériaux constituant les plans-reliefs ont largement souffert des affres du temps, ce qui a un impact fort sur la numérisation. Certains plans-reliefs sont en mauvais état, papiers peints ou gravés sont décollés ou absents, une couche de poussière peut recouvrir le modèle, l'humidité a déformé de nombreux éléments (Figure 55). De la quantité de poussière va dépendre la qualité des photographies à la base de tout procédé photogrammétrique. De manière générale, du fait de la fragilité des plans-reliefs, la numérisation doit être conduite sans contact, uniquement avec des techniques non intrusives.

3. Facteur environnemental.

L'environnement dans lequel sont exposés des plans-reliefs a des répercussions sur les sessions de numérisation. L'éclairage est ainsi un facteur prépondérant pour les techniques passives, car dans le cas de la photogrammétrie par exemple, il va influencer directement la qualité des photographies à la base de cette technique. Alors que cette technique est déjà sensible à la présence de poussière (Figure 55), un éclairage d'appoint est nécessaire pour toute prise de clichés à vocation photogrammétrique.

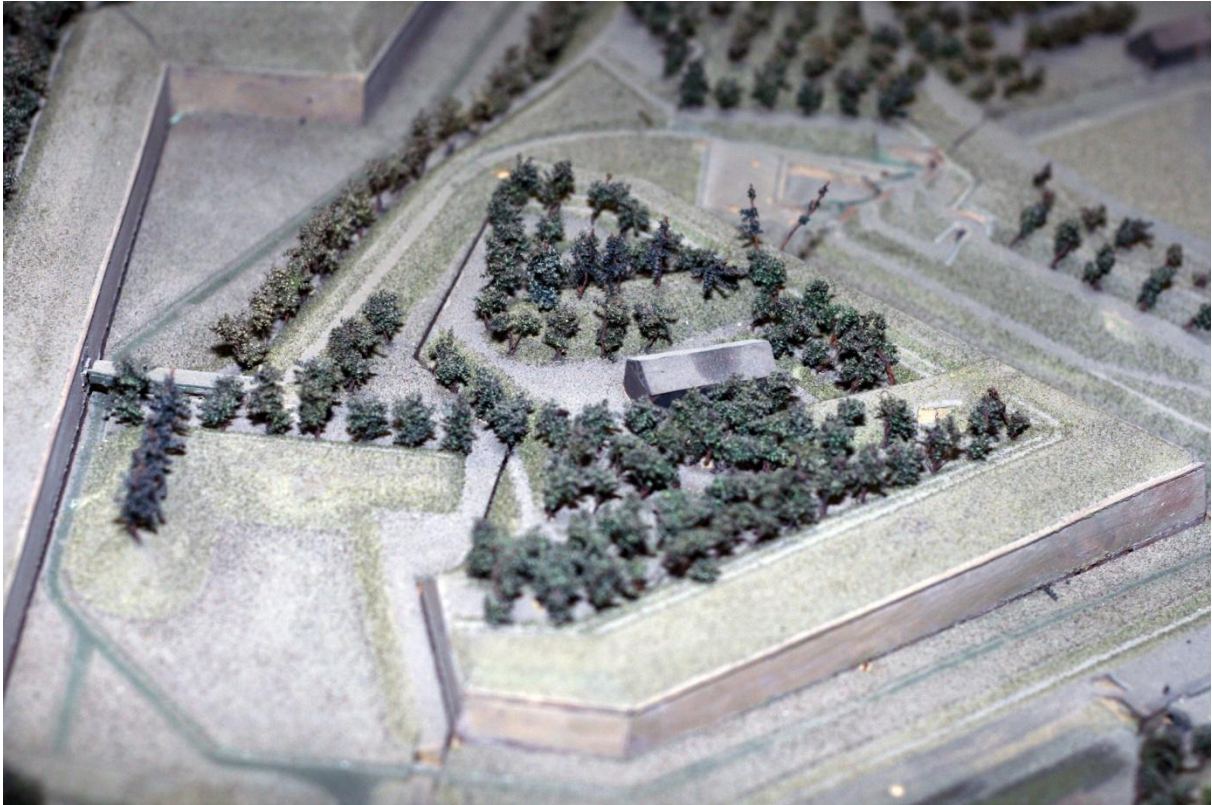


Figure 55 Détails du plan-relief de Toul. La photographie n'était pas destinée à une utilisation en photogrammétrie, mais elle met en avant les enjeux liés à cette technique. Ainsi, la zone de netteté de la photographie est réduite : ici, elle ne dépasse pas une bande d'une quinzaine de centimètres. On constate également la présence de végétation qui masque les détails les plus fins de l'ouvrage de fortification et notamment les banquettes de tir. Enfin, la présence de poussière, comme le trahit la trace sur l'unique bâtiment représenté, atténue le contraste du cliché.

Photo : auteur

4. Facteurs économiques

Les moyens techniques mis en œuvre pour l'acquisition tridimensionnelle des plans-reliefs doivent être précis, maniables, abordables et rapides. Du fait des dimensions des tables et de la densité d'éléments représentés sur les plans-reliefs, c'est-à-dire du niveau de détail, certaines zones des maquettes sont difficilement accessibles. Les cœurs d'îlots situés au centre des tables sont en particulier compliqués à atteindre et à relever. Pour les maquettes exposées derrière des vitrines, et en l'impossibilité de les déposer, notamment à cause des coûts que cela occasionnerait, les prises photographiques peuvent être réalisées avec des filtres polarisants pour atténuer les reflets. Cependant, effectuer un relevé complet d'une maquette montée et exposée demeure problématique à cause du manque d'accessibilité. Pour les plans-reliefs en réserves ou encaissés, les déplacer ne peut se faire qu'avec du personnel formé tant ces objets sont fragiles, encombrants et lourds. Le recours à des techniques d'acquisition économiques et hautement maniables est alors indispensable.

C'est pourquoi il est important de définir l'objectif du projet de numérisation des maquettes pour pouvoir déterminer les caractéristiques de l'acquisition tridimensionnelle. De la densité de points à acquérir dépend la vitesse des outils de numérisation et donc du temps pendant lequel est manipulé l'objet étudié (augmentation des risques de dégradation, immobilisation de l'objet, etc.) Dans le cas de projets de numérisa-

tion dans lesquels le modèle 3D final est utilisé sur Google Earth (Rome Reborn, Hambourg), une acquisition à une résolution trop importante n'apporterait pas de plus-value lors de la reconstruction virtuelle.

Dans une majorité de cas, les plans-reliefs sont en caisses et seuls des événements exceptionnels permettent d'y accéder comme ce fut le cas pour le plan-relief de Toul, lors de la première session d'acquisition menée par le MAP-CRAI (III.2). Lorsqu'ils sont exposés, les plans-reliefs sont généralement derrière des vitrines climatisées et baignent dans une pénombre qui préserve couleurs et matériaux photosensibles comme nous avons pu le constater lors de la seconde session d'acquisition tridimensionnelle (III.3). Outre ces difficultés logistiques, les techniques d'acquisition mises en œuvre doivent pouvoir fonctionner sur des objets de grandes tailles et présentant un niveau de détail élevé : des caractéristiques physiques exceptionnelles. Enfin, les résultats des différents relevés entrepris sont présentés et commentés en fin de chapitre (III.4).

III.2. Première session d'acquisition – plan-relief de Toul

En 2010, une acquisition tridimensionnelle par capteur laser a été effectuée. Le matériel utilisé est un EXAscan de Creafom, un capteur à triangulation très maniable⁷⁴. En début d'année, une partie de la ville et d'une table de campagne ont été numérisées à une précision de 2mm, ce qui nous a permis de mettre en évidence l'ampleur des difficultés propres à la numérisation d'une maquette. D'une part, les arêtes présentent toutes des congés (un adoucissement en portion de cercle) et les surfaces ont un aspect granuleux et d'autre part, de nombreux objets nous restent inaccessibles tels que les rues étroites, venelles, pieds de bâtiments et de nombreuses parties des fortifications (Figure 56). Un second relevé fut entrepris avec des numérisations à 0,5mm et à 0,3mm. Les nuages de points sont beaucoup plus denses et satisfaisants dans les deux cas. Le temps nécessaire à l'acquisition nous fait préférer une précision de 0,5 mm, mais même avec cette valeur, il faut compter entre une demi-heure et trois quarts d'heure pour numériser un volume de 13cm³. Aussi fut-il envisagé de réaliser la numérisation des plans-reliefs par photogrammétrie.

Une première série de photographies réalisée en début d'année 2010 fut employée dans le cadre d'une acquisition stéréophotographique avec PhotoModeler Scanner (PMS). Les clichés doivent avoir suffisamment de surfaces en commun pour devenir des couples stéréoscopiques. La présence d'une trappe dans les combles des Invalides à plus de quatre mètres au dessus de la maquette nous a permis de réaliser des prises en vue aérienne, mais les limites matérielles et l'éloignement imposé par la position de la trappe eurent un impact sur le niveau de précision de la restitution sur PMS. Outre la nécessité de prendre des photographies avec un recouvrement important (seule la zone apparaissant sur les deux clichés est traitée), la qualité des prises de vue est déterminante, car la photogrammétrie ne fonctionne de manière optimale qu'avec des objets aux textures contrastées (Alby et al., 2009). Sur une maquette recouverte de poussière et sans un éclairage adéquat, les résultats ont été inexploitable (Figure 57, a). PhotoModeler permet également d'effectuer de la photomodélisation par photogrammétrie multi-images. À partir de plusieurs photographies, il est possible de retrouver leurs orientations et leurs positions relatives pour modéliser ensuite

⁷⁴ cf. Partie A, chapitre II.2.a.b, page 22

manuellement, et directement, sur les clichés. La précision du placement de ces points peut être contrôlée facilement et améliorée afin d'être le plus fidèle possible à la réalité (Figure 57, b). Néanmoins, à l'échelle des fortifications, ce processus est extrêmement fastidieux et sujet à de nombreuses interprétations du fait de la présence massive de végétation au niveau des défenses.

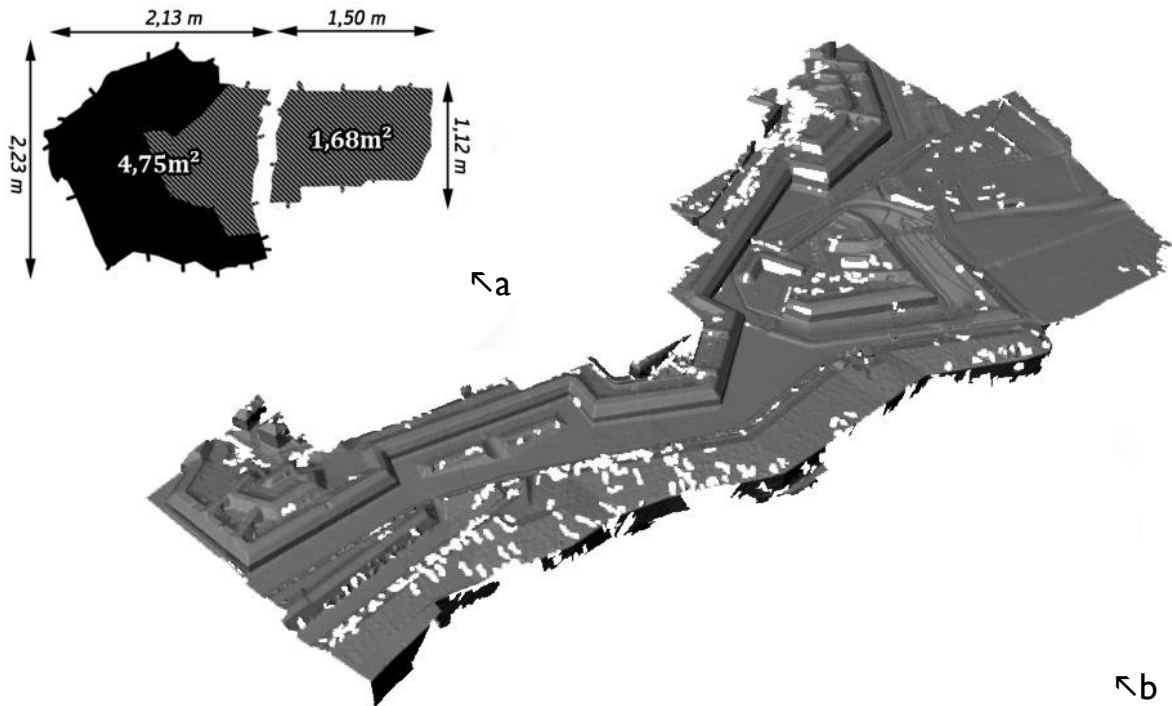


Figure 56. Dimensions des tables 1 et 4 du plan-relief de Toul avec les parties numérisées hachurées (a) et maillage d'une partie des fortifications bastionnées du plan-relief de Toul obtenue par relevé laser (b). Les occlusions sont nombreuses du fait de la présence de végétation, ce qui se traduit par les nombreux trous dans le maillage. La Figure 153 en annexe présente une vue de dessus des tables 1 et 4 du plan-relief de Toul.

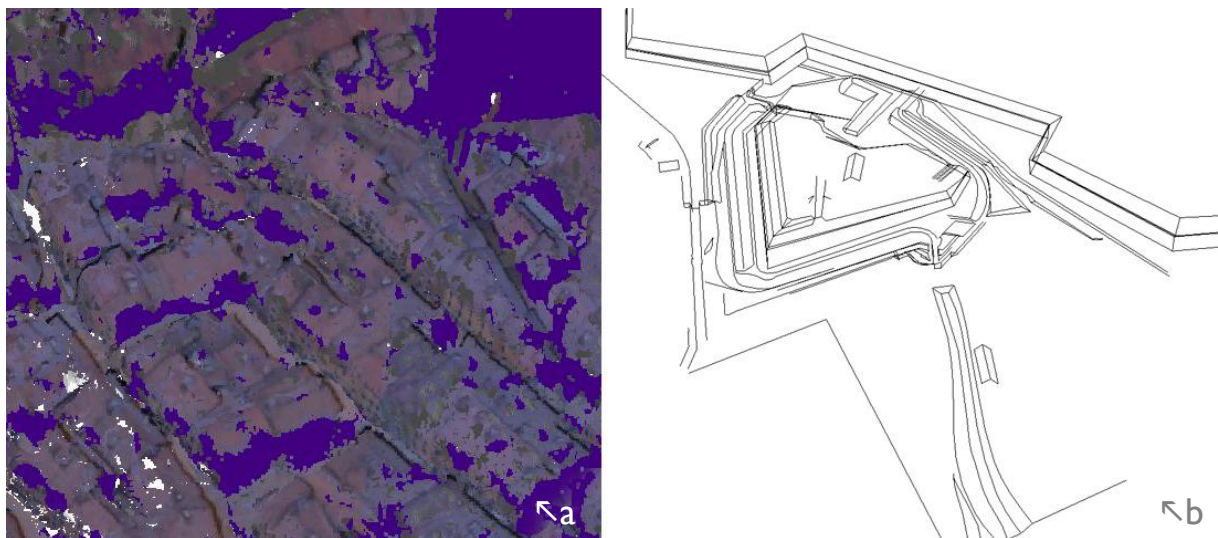


Figure 57. Nuage de points d'une partie de la ville de Toul obtenu par stéréophotogrammétrie avec Photomodeler Scanner (a). Malgré l'ajout de photographies supplémentaires, le logiciel ne parvient pas à générer des données exploitables. La reconstruction manuelle par photomodélisation des fortifications (b) permet de sélectionner les données à relever, mais l'opération est longue et nécessite de nombreuses interprétations par l'utilisateur.

III.3. Seconde session d'acquisition – plans-reliefs de Toul et Strasbourg

Afin d'améliorer l'étape de l'acquisition tridimensionnelle, aussi bien en temps de travail qu'en moyens à déployer, de nouveaux tests ont été entrepris sur les données dont nous disposons sur le plan-relief de Toul, mais aussi sur l'exemplaire de Strasbourg conservé au Musée Historique.

Les récentes avancées en matière de photogrammétrie ont permis notamment l'arrivée de nouveaux outils comme 123D catch, un service gratuit de photogrammétrie. N'ayant plus accès au plan-relief de Toul, des tests ont été effectués avec les mêmes photographies que nous avons utilisées lors des expérimentations avec Photomodeler Scanner alors qu'elles n'étaient pas destinées à une telle utilisation. Force est de constater que les données produites sont comparables à celles que nous avons pu acquérir avec le capteur laser (Figure 58). L'écart évalué entre la photogrammétrie et la lasergrammétrie est faible : il est d'environ 0,5mm, à peine plus élevé que l'écart type calculé en laboratoire avec les mêmes techniques sur un îlot théorique (Giraud, 2013).

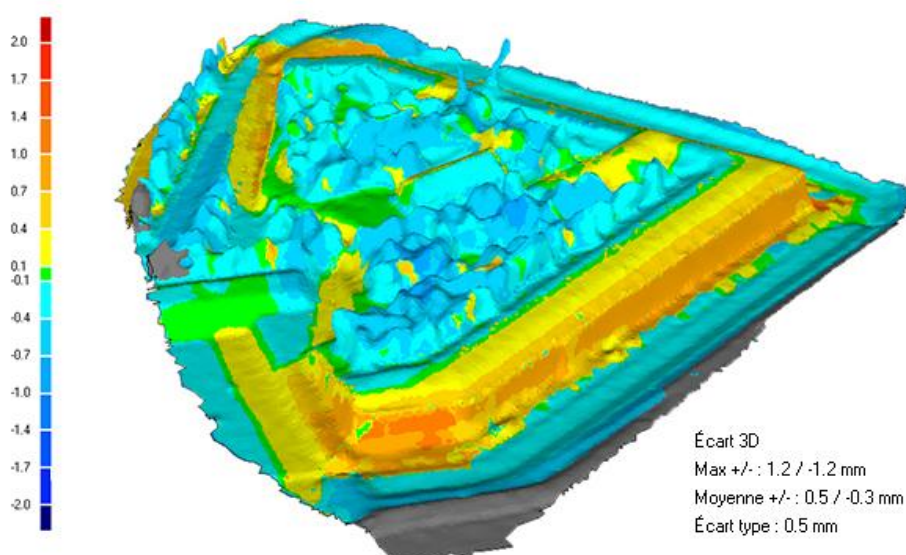


Figure 58. Comparaison des maillages de la demi-lune 47 du plan-relief de Toul obtenus par 123D Catch et capteur laser. L'écart type entre les deux géométries est très faible, de l'ordre de 0,5mm.

Néanmoins, par manque de photographies adaptées aux exigences de 123D Catch, nous n'avons pas pu obtenir des données fiables au-delà de la demi-lune 47 du plan-relief de Toul. Il serait maintenant nécessaire d'effectuer de nouveaux relevés photographiques du plan-relief de Toul adaptés à une utilisation sur 123D Catch pour pouvoir évaluer de manière fiable et complète les relevés des deux techniques. Cependant, on peut déjà remarquer le haut degré d'automatisation de 123D Catch qui ne laisse que peu de possibilités à l'utilisateur de paramétrer la numérisation. Le nuage de points produit par photogrammétrie est directement maillé et des algorithmes comblent automatiquement les trous de petites dimensions, sans que l'utilisateur ait la possibilité d'agir sur ces paramètres, à l'inverse de la lasergrammétrie qui produit un maillage brut (Figure 59). Ces contraintes nous conduisent également à nous tourner vers d'autres outils SfM⁷⁵ existants qui, pour l'instant, n'ont pu être comparé avec les spécificités de notre projet faute de temps.

⁷⁵ cf. Partie A, chapitre II.3.b, page 37

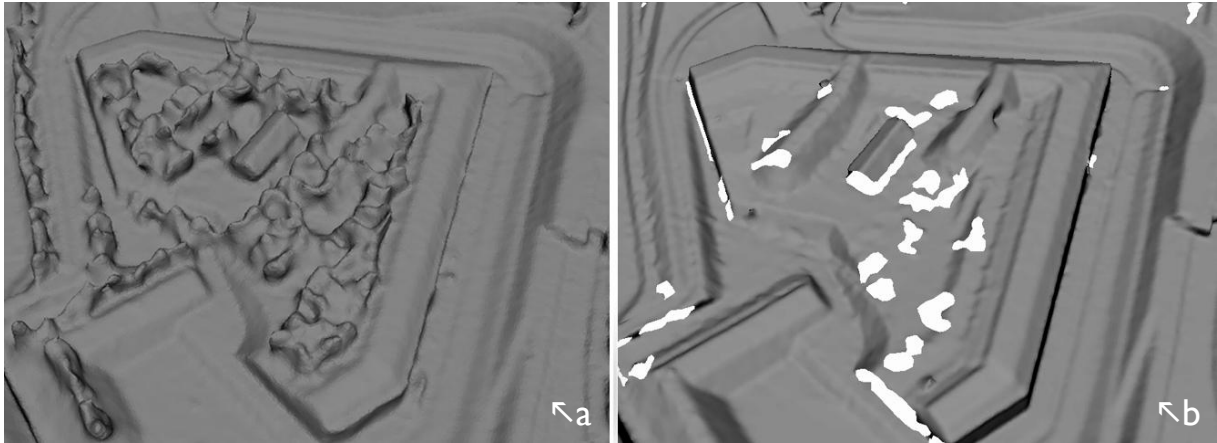


Figure 59. Maillages de la demi-lune 47 du plan-relief de Toul obtenus par 123D Catch (a) et par capteur laser (b). Parmi les défauts des deux relevés, notons la présence d'arêtes de congé pour les deux techniques. Les trous apparents dans le relevé laser correspondent à des surfaces dont la couleur de surface ne permet pas le renvoi d'information (le noir notamment) ou à des objets à la géométrie trop morcelée comme les arbres qui peuvent aussi agir comme des masques.

Outre le plan-relief de Toul, celui de Strasbourg a également été étudié. Le Musée historique de Strasbourg a en effet en sa possession le premier plan-relief de la ville daté de 1725. Exposé derrière une vitrine, un pont mobile permet de se déplacer à quelques centimètres au-dessus de Notre-Dame de Strasbourg. La photogrammétrie peut être facilement mise en œuvre, car elle ne requiert qu'un appareil photographique comme dispositif d'acquisition *in situ*. Pendant l'espace de quelques heures, il fut ainsi possible d'effectuer de nombreuses prises de vue des fortifications de Strasbourg. Pour pallier le manque de lumière, l'appareil est équipé d'un réflecteur pour permettre au flash un rayon d'action plus large tout en adoucissant les ombres.

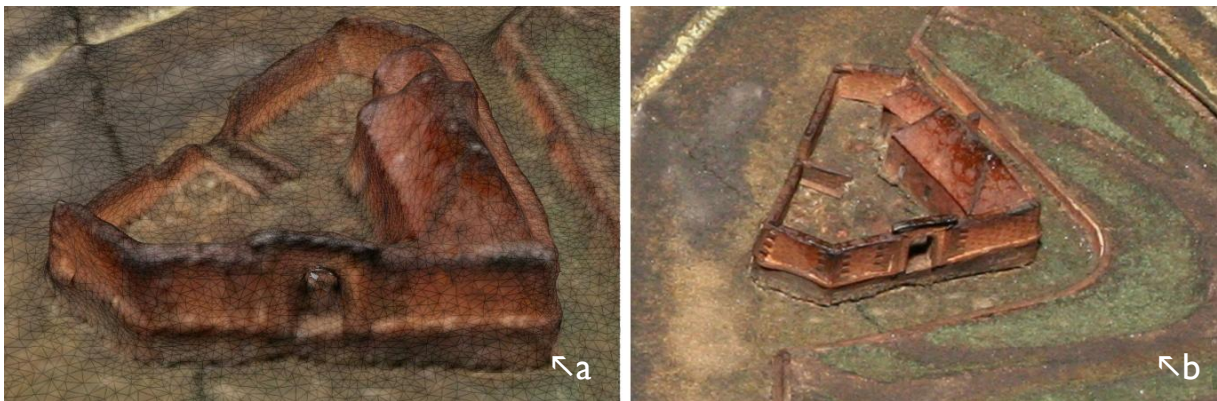


Figure 60. Maillage obtenu par 123DCatch (a) et détail du plan-relief de Strasbourg au niveau d'une demi-lune (b).

III.4. Bilan de l'acquisition de données tridimensionnelles de plans-reliefs

Il est encore prématuré pour affirmer la supériorité d'une technique de numérisation sur une autre. La facilité de mise en œuvre de la photogrammétrie est certes un avantage considérable compte tenu des contraintes logistiques liées aux conditions d'exposition des plans-reliefs. Néanmoins, les techniques actives sont capables d'opérer même en l'absence d'éclairage. Ainsi, les critères qui peuvent nous faire préférer une technique à une autre dépendent essentiellement de facteurs extrinsèques aux maquettes comme l'environnement dans lequel se trouve le plan-relief.

D'un côté, les facteurs logistiques nous obligent à utiliser différentes techniques de numérisation selon les conditions d'exposition ou de dépôt des plans-reliefs. D'un autre côté, nous pouvons aussi profiter, assez rarement il est vrai, de données que d'autres acteurs impliqués dans la numérisation de plans-reliefs peuvent mettre à disposition, à l'image d'Art Graphique & Patrimoine⁷⁶ (AGP) pour le relevé de la maquette de Marsal. Étant donné les origines différentes des données, on ne maîtrise pas la qualité des données. En conséquence de quoi notre proposition doit être suffisamment robuste pour être capable de traiter des données hétérogènes et ainsi transformer une contrainte en opportunité.

À ce jour, nous disposons d'un relevé complet du plan-relief de Marsal et de deux relevés partiels des plans-reliefs de Toul et de Strasbourg. Les données produites par différentes techniques de numérisation sont variables tant en densité qu'en régularité de points. L'acquisition tridimensionnelle pour le plan-relief de Marsal a été accomplie par AGP à l'aide d'un capteur laser Vivid de Konica Minolta avec une précision que l'on peut estimer à 1,5 mm. Nous ne disposons que du maillage dont on constate l'irrégularité du réseau de triangle (Figure 61, c). La grossièreté de ces données s'explique notamment par l'objet du projet mené par AGP qui était un essai de restitution de la place forte de Marsal et non la reconstruction virtuelle du plan-relief. Le plan-relief de Strasbourg a été numérisé grâce à 123D Catch à une précision que l'on estime à 0,5 mm (Figure 61, a). Le maillage est aussi irrégulier si on le compare au relevé de Toul qui a été réalisé à l'aide d'un capteur laser à triangulation EXAscan de Creaform à une précision également de 0,5 mm (Figure 61, b).

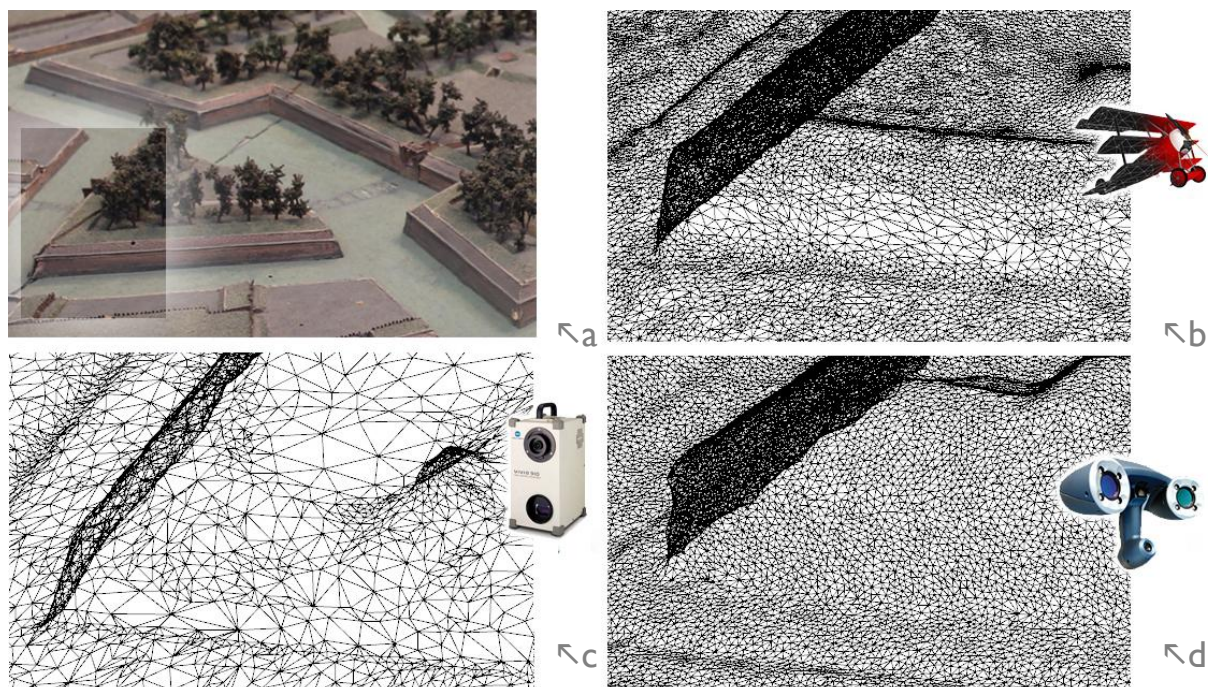


Figure 61. Chacun des maillages représente l'angle sortant d'un ouvrage de fortification de type demi-lune (a). Maillages issus de la numérisation des plans-reliefs de Strasbourg, photogrammétrie 123D Catch (a), de Marsal, capteur laser à triangulation Vivid 910 de Konica Minolta (b) et de Toul, capteur laser à triangulation EXAscan de Creaform (d).

Photo : auteur

⁷⁶ cf. Partie A, chapitre IV.8.a.b, page 69

Chapitre IV. Les traités d'architecture militaire et la modélisation de connaissances

La conception des fortifications bastionnées dépend de règles de construction géométriques relatives à la capacité de l'artillerie adverse et qui ont évolué au fur et à mesure des avancées techniques de l'armement (portée, capacité de pénétration, ricochets, etc.). Une fortification peut être le résultat de nombreuses interventions s'étalant sur plusieurs siècles. À l'instar de l'architecture classique, les règles de la fortification bastionnée ont été retranscrites à travers quantité de traités dont l'intérêt, du point de vue de notre projet en particulier, est variable. Les ouvrages traitant d'architecture militaire sont nombreux, mais peu analysés au regard des études portant sur les traités d'architecture classique. La théorie exposée dans les traités de fortification permet de jeter les bases de la discipline (Girard, 1986). Les grands principes, l'histoire, la terminologie, les méthodes de construction, etc. sont rassemblés dans ces ouvrages dont il faut encore analyser le contenu, la pertinence afin d'en extraire les connaissances utiles à notre projet de reconstruction virtuelle.

Dans une première partie (IV.1), les liens entre ce genre littéraire et la fortification bastionnée sont approfondis avant que nous exposions les modalités nous ayant conduits au choix d'un corpus restreint de traités en partie IV.2. Enfin, dans la partie IV.3, la question de l'organisation des connaissances pertinentes pour notre projet est posée avant qu'en soit proposée une modélisation dans la partie IV.4.

IV.1. Traités et fortification bastionnée

Le traité « est un livre, présenté comme une totalité organisée. [...] Il s'assigne pour objet [...] l'élaboration de principes universels et de règles génératives permettant la création, non la transmission de préceptes ou de recettes. Ces principes et ces règles sont destinés à engendrer et à couvrir le champ total du bâtir, de la maison à la ville, de la construction à l'architecture. »

(Choay, 1996)

Les traités de fortification bastionnée sont apparentés aux traités d'architecture, ouvrages appartenant à un genre littéraire qui (ré)apparaît au XVI^e siècle et aura une postérité florissante. À la différence de ces ouvrages, les traités de fortification bastionnée ont fait l'objet de peu d'étude, aussi, nous intéressons-nous brièvement dans première partie (IV.1.a) à ce genre littéraire qui répond à « une aspiration doctrinale [...] qui aboutira deux ou trois siècles plus tard avec l'*Encyclopédie* de d'Alembert et Diderot » (Pierre, 1992 ; Guillaume, 1988). C'est cette notion d'encyclopédie, cette volonté de présenter un « ouvrage qui fait le tour de [...] tout un domaine de [...] connaissances et les expose selon un ordre alphabétique ou thématique » (CNRTL, 2012) qui est à retenir, car la fortification bastionnée constitue une discipline complexe du fait des évolutions qu'elle a connues en peu de temps, comme établi dans la partie IV.1.b.

Enfin, même si la notoriété des traités militaires est moindre que celle de ces équivalents civils, cela n'est pas du fait du nombre conséquent de publications qui s'est étalé sur plusieurs siècles. La partie IV.1.c présentera de manière synthétique le corpus constitué par ces ouvrages à travers leurs auteurs.

IV.1.a. Traités d'architecture classique

Le seul traité d'architecture antique qui nous est parvenu, *De architectura*, est déjà l'œuvre d'un architecte ingénieur du nom de Vitruve (Ier siècle) dont les travaux étaient aussi bien civils que militaires. Il est coutume de situer cet ouvrage comme étant « à l'origine de la démarche trattatiste occidentale » (Choay, 1996), c'est-à-dire de cette longue tradition de publication de traités d'architecture. Grâce à Leo Battista Alberti (1404 – 1472), le livre de Vitruve devient l'ouvrage théorique de référence de l'époque moderne, en particulier auprès des ingénieurs militaires, bâtisseurs de fortifications (Pernot, 1982).

Au siècle suivant, Vignole (1507 – 1573) réutilise le concept d'ordre dans son traité *Regola delli cinque ordini d'architettura*. Dès lors, les traités d'architecture, par le biais des ordres, deviennent un parfait vecteur de diffusion des canons de la Renaissance à travers l'Europe (Thoenes, 2003). Aux trois ordres architecturaux initiaux : dorique, ionique, corinthien, sont ajoutés les ordres toscan et composite. Au XVIIIe siècle, les architectes révolutionnaires, tels que Ledoux ou Boullée, proposent à leur tour de nouveaux ordres architecturaux (Jacques, 1988), démontrant la capacité à communiquer de la notion d'ordre que l'on peut rapprocher de la notion de système en fortification bastionnée .

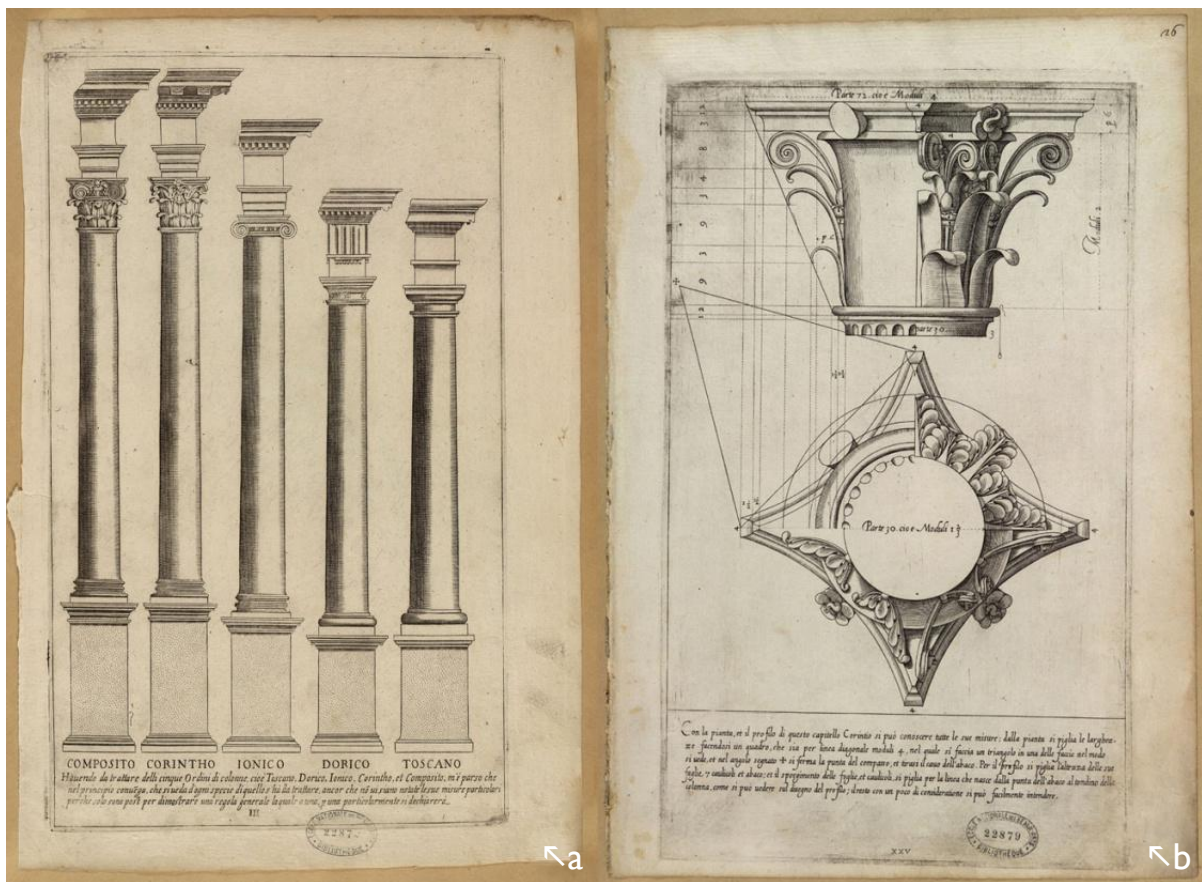


Figure 62. Planches illustrant les cinq ordres classiques (a) et le tracé du chapiteau corinthien (b).

Sources : Vignola, 1642

IV.1.b. La fortification bastionnée et ses systèmes

Avec l'avènement d'un nouveau type de munition – les boulets en fonte se substituant aux boulets en pierre – l'artillerie devient à même de superposer les coups pour faire brèche et ainsi renverser l'équilibre qui existait au Moyen Âge entre attaque et défense. Après la mise en œuvre de solutions de fortune au XVe siècle par l'ajout de fausse-braies et de moineaux⁷⁷ aux remparts médiévaux, la défense évolue jusqu'à remplacer la tour par le bastion et la muraille par le rempart (Folio et al., 2008).

L'enceinte théorique est formée d'un polygone fermé qui présente sur chacun de ses côtés un front bastionné composé de deux demi-bastions (une face et un flanc) reliés par une courtine (Figure 63). Ce tracé a pour particularité d'avoir ses parties qui se flanquent, c'est-à-dire qui se protègent, réciproquement (Pérouse De Montclos, 2000). En fortification bastionnée, il existe une moulure de pierre semi-circulaire matérialisant la magistrale : c'est-à-dire la ligne formée par l'arête supérieure du mur d'escarpe. Cet élément, le cordon, « seule concession ornementale » de la fortification, permet de matérialiser la magistrale, le tracé directeur de tout front bastionné. D'un ingénieur à un autre, d'une époque à une autre, la magistrale évolue et tout le système fortifié avec elle. Bien que considérables, tous ces systèmes ont toujours pour vocation d'attribuer « aux différentes parties de l'ensemble leur position et leurs proportions » à l'image des ordres précédemment évoqués qui « ont constitué à eux seuls la structure architectonique et formelle de certaines compositions : ils en ont été les éléments uniques ; en attribuant aux différentes parties de l'ensemble leur position et leurs proportions » (Lurçat, 1953, p. 271).

Du XVIIe au XIXe siècle, la fortification bastionnée est généralisée à l'ensemble des places fortes européennes. Au cours de ces siècles, de nombreux systèmes de fortification bastionnée vont être proposés, beaucoup ne seront pas construits, mais la plupart respectent les trois principes énoncés ci-dessous :

1. Les dimensions des ouvrages et leurs distances les uns par rapport aux autres sont fonction de la portée de l'artillerie ;
2. L'étagement des feux est rendu possible par le placement des parapets dans l'axe du glacis afin de permettre le tir rasant que cela soit par les canons du rempart ou les mousquetaires du chemin couvert (Figure 43, p. 93) ;
3. La défense en profondeur par la multiplication des ouvrages notamment par le biais d'un fossé pouvant être inondé et des dehors et des ouvrages avancés : des constructions maintenant à distance l'artillerie ennemie.

⁷⁷ La fausse-braie est une enceinte basse enveloppant le corps de place et le moineau est une casemate dans le fossé, adossée à l'enceinte et permettant de battre le fossé.

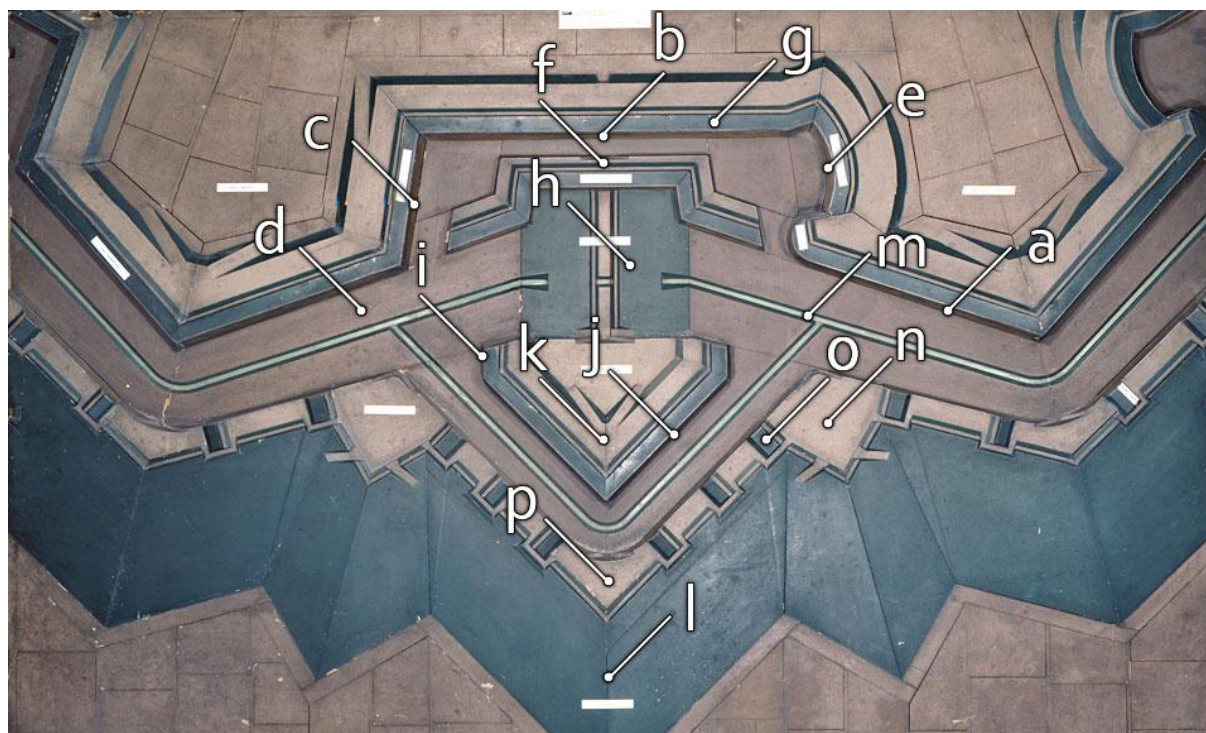


Figure 63 Quelques éléments de fortification bastionnée: face (a), courtine (b), flanc (c), fossé (d), flanc à orillon (e), tenaille (f), parapet (g), caponnière (h), flanc (i), face (j), demi-lune (k), glacis (l), cunette (m), place d'armes (n), traverse (o).

D'après : Musée des Plans-reliefs / Bruno Arrigoni

IV.1.c. Approche historique des traités d'architecture militaire

Les ouvrages d'architecture militaire, bien que méconnus, sont tout aussi riches que leurs équivalents civils. Ils commencent à être publiés dès la moitié du XVI^e siècle. Déjà ces ouvrages : « font de la géométrie l'essentiel des connaissances utiles à un ingénieur » (Virol, 2003) pour l'élaboration de fortifications. Leurs contenus sont également riches en ce qui concerne les principes, l'histoire, la terminologie et les méthodes de construction des fortifications. Ce corpus d'une centaine d'ouvrages peut être synthétisé en plusieurs vagues de publications (Orgeix, 2009a)⁷⁸.

La première de ces vagues marque la naissance d'une école française de la fortification avec notamment la parution du premier traité en français en 1600 par Jean Errard de Bar-le-Duc (1554 – 1610). On lui doit les citadelles d'Amiens (Somme) et Verdun (Meuse) ainsi que les modifications apportées à celles de Doullens (Somme), Montreuil (Pas-de-Calais), Sedan (Ardennes) et peut-être Sisteron (Alpes-de-Haute-Provence) (Faucherre, François, 1996). Antoine de Ville (vers 1450 – 1504) et Blaise Pagan (1604 – 1665), qui prirent part aux grands sièges qui marquèrent le règne de Louis XIII, ont amélioré les travaux d'Errard. Leurs contributions sont visibles par les améliorations qu'ils apportent au tracé du front bastionné pour rendre toutes ses parties flanquées entre elles (Figure 64).

⁷⁸ cf. Frise chronologique représentant quelques uns des auteurs de traités de fortification selon la date de publication de l'ouvrage., page 232

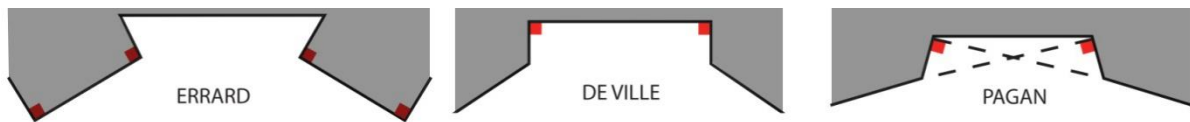


Figure 64 Le travail sur le flanquement réciproque des différentes parties d'un front bastionné permet d'aboutir au tracé de Pagan qui sera repris par Vauban (les carrés rouges signalent la présence d'un angle droit).

La deuxième série de publications est le fruit du travail de « maîtres de collèges jésuites ». Paraissant au cours de la deuxième moitié du XVII^e siècle, cette production, réclamée par la noblesse, se destine à de nouveaux lecteurs, en particulier à de « jeunes hommes d'élite ».

Le règne de Louis XIV et les conflits qu'il génère entraînent une augmentation des effectifs du corps des ingénieurs. La mise en place d'un examen d'aptitudes, d'une mise à l'épreuve sur le terrain et d'un accompagnement par un homme d'expérience parachève la professionnalisation du métier d'ingénieur. Cette évolution est accompagnée d'une troisième série de traités destinée à l'instruction personnelle des ingénieurs militaires. Des ouvrages à la structure plus classiques et des traductions de traités étrangers viennent enrichir la théorie des ingénieurs.

Les Travaux de Mars ou l'Art de la guerre, considéré comme le *vade-mecum* de l'ingénieur, est publié en 1671. Son auteur, Alain Manesson Mallet (1630 – 1706), auteur du premier plan-relief français et « un des ingénieurs favoris de Vauban » (Orgeix, 2008), ne fait presque aucune allusion à son illustre maître. Le nom de Vauban est pourtant garanti de succès commercial comme en témoigne la parution d'ouvrages pirates de manuscrits de l'ingénieur à la fin du règne de Louis XIV.

Architecture civile et militaire tendent ensuite à être traitées conjointement comme en témoigne Bernard Forest de Bélidor (1698 – 1761) avec son ouvrage *La Science des ingénieurs* (Bélidor, 1729) qui est utilisé pour la formation des ingénieurs au XVIII^e siècle (Blanchard, 1979). En 1748, la fondation de l'École de Mézières, va faire de Vauban une figure culte. Le système du front moderne, fruit des améliorations menées par Cormontaigne sur les méthodes de Vauban, est alors inculqué à des générations d'ingénieurs (Lombaerde, 2007).

IV.1.d. Conclusion

La présence de traités d'architecture classique dans la bibliothèque des ingénieurs militaires montre l'influence de ces ouvrages. Néanmoins, ils ne remplacent en rien l'expérience du terrain comme n'a cessé de l'affirmer Vauban. La parution de traités de fortification s'étale sur plus de cent cinquante ans, la qualité de ces traités est inégale, ce que trahit en partie la diversité des profils de leurs auteurs : ingénieurs, jésuites, mathématiciens, chevaliers, etc. L'apogée de la fortification bastionnée, dont on avait mis en évidence la contemporanéité avec l'œuvre de Vauban, coïncide également avec l'intense activité éditoriale en matière de traités de fortification.

IV.2. Choix des traités

Bien qu'abondantes, les publications de traités de fortification ne sont pas rentrées dans la postérité de l'histoire de l'architecture à l'inverse des traités d'architecture classique. Malgré quelques tentatives ambitieuses, « le difficile équilibre entre identification, sélection, catalogage raisonné des ouvrages et analyse de leurs discours n'a jamais été atteint » (Blondel, 1683). C'est pourquoi, pour la conduite de l'analyse des traités de fortification, on utilisera deux des rares travaux à traiter du sujet. Il y a tout d'abord le catalogue critique des traités de fortification et d'artillerie tenu à jour par Jean-Marie Balliet (2009) et surtout le projet de catalogue raisonné d'Émilie d'Orgeix (2009b) sur lequel s'appuie en grande partie ce chapitre. Cette dernière s'attache à une période précise, allant de 1601 – année qui voit la création de la charge d'« ingénieur du Roy » par Henry IV – à 1748, année où est inaugurée la première école du génie. On constate que ce cadre temporel coïncide avec la plupart des traités publiés au cours de ce siècle et demi.

IV.2.a. Les réserves émises par Vauban sur les traités

Dans le chapitre précédent, nous avons vu toute l'importance de Vauban dans la fortification bastionnée. « Vauban, qui a fait travailler à 300 places anciennes, et qui en fait 33 neuves » (Diderot, d'Alembert, 1751) intervient à une époque favorable à l'édification de fortification avec le règne de Louis XIV au cours duquel se succèdent de nombreux conflits se traduisant par des gains et des pertes de territoires. Son influence va marquer durablement l'art de la fortification. Son œuvre, qu'elle soit construite ou manuscrite, a une portée sans égale sur ses contemporains et ses successeurs. Malheureusement, nous ne pouvons nous fier qu'à des paroles rapportées, car Vauban n'a jamais écrit de traité de fortification.

IV.2.b. L'influence de Vauban

Règles et systèmes ne sont d'aucune aide dans l'art de fortifier. Tel est le discours de Vauban et la principale raison de l'absence de traité spécifique signé de la main de l'ingénieur. « Vauban ne se réclame [...] pas directement d'un ouvrage précis de fortification, et il n'en recommande [pas] la lecture » (Virol, 2003). Profitant de ce vide et de l'aura de Vauban, de nombreux auteurs en France ou à l'étranger vont se lancer dans la rédaction d'ouvrages aux titres attractifs : *Manière de fortifier selon la méthode de monsieur de Vauban...*, *Véritable manière de fortifier de Mr. De Vauban...*, *Le véritable Vauban se montrant au lieu du faux Vauban...*, etc. Abstraction faite de ceux qui se sont approprié le nom de Vauban pour se garantir le succès commercial tel que Dufay, Cambray et Sturm, dont on vient de citer les ouvrages et pour lesquels on ne peut retenir que la partie de l'ouvrage qui porte sur les dehors et les ouvrages avancés, d'autres auteurs s'inspirent de « la pensée et [des] expériences menées par Vauban » pour asseoir leurs propos.

Allain Manesson Mallet (1630 – 1706), déjà évoqué précédemment, figure parmi ces rares ingénieurs estimés de Vauban. Son œuvre principale, *Les Travaux de Mars ou l'art de la guerre* (1671), illustrée par plus de 400 planches, fait rare à l'époque, est qualifié par le général Bardin dans son dictionnaire des auteurs militaires de « première production capitale que le siècle de Louis XIV ait vu éclore » (Bardin, 2002). La deuxième édition (1684) du traité de Manesson Mallet, divisée en trois volumes, connaît un

succès tout aussi important. Cette publication vient appuyer la professionnalisation du corps des ingénieurs menée sous l'impulsion de Vauban (Warmoes, 2008). À noter que c'est la première fois qu'on consacre un chapitre entier de traité de fortification à faire état des plans-reliefs et des moyens pour les réaliser (Orgeix, 2008).

La première moitié du XVII^e siècle a été marquée par la publication de trois traités majeurs, ceux d'Errard, Pagan et de Ville ; la seconde moitié par Allain Manesson Mallet. En plus de son travail, ces quelques décennies sont marquées par la parution de traités qui ne font « qu'ordonner [...] des méthodes déjà connues » (Orgeix et al., 2007). Le XVIII^e siècle est une période où les publications de traités novateurs sont également rares, mais la fortification bastionnée connaissant une certaine maturité, c'est également une époque propice à l'apparition de grands « compilateurs ».

Guillaume Le Blond (1704 – 1781), qui fut le maître de mathématiques de Louis XVI, est à l'origine d'ouvrages de compilation. Spécialisé dans l'art de la guerre et auteur des articles relatifs à l'art militaire dans la première édition de l'*Encyclopédie de Diderot et d'Alembert*, « il offre une bonne synthèse de l'école française de fortification (Errard, Vauban, De Ville, etc.) ». Le général Bardin le qualifie aussi de « plus infatigable de nos compilateurs ». Parmi ses ouvrages, le *Traité de l'Attaque des Places* (1780) « réalise une récapitulation des préceptes des différents ingénieurs français même s'il reprend essentiellement les thèses de Vauban » (Balliet, 2009).

Bernard Forest de Bélidor (1698 – 1761), véritable homme de science accorde une grande importance aux mathématiques. Son « projet de mathématiser et théoriser la science des ingénieurs » (Langins, 2007) est prématuré et voué à l'échec à cette époque encore peu encline à accorder du crédit aux préceptes qui n'ont pas été éprouvés sur le terrain. « Vauban [...] aurait [...] donné son approbation à » (Balliet, 2009) *La Science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile* (1729), ouvrage dans lequel Bélidor n'hésite pas à revenir sur l'œuvre de Vauban en s'appuyant sur la raison scientifique.

Louis de Cormontaigne (1696 – 1752), qui a beaucoup écrit, mais a été peu publié, a rédigé de « nombreux mémoires sur tous les aspects de la fortification ». Son œuvre posthume influencera l'art de la fortification jusque dans ses dernières années (Balliet, 2009). *Mémorial pour la fortification permanente et passagère* (1809) permet aux élèves ingénieurs d'y trouver « ce que Vauban s'était refusé à écrire, c'est-à-dire une pédagogie de la fortification » (Rocolle, 2008). Cet ouvrage, qui fait la part belle à Vauban, apporte aussi quelques éclairages sur les spécificités de certaines fortifications. Ainsi, l'auteur précise que la fortification de Toul diffère de la théorie pour des raisons d'économie. Le côté extérieur est de 170 toises là où il aurait dû être de 180. La perpendiculaire est également différente : 1/8 du côté extérieur au lieu des 1/6 attendu. Affecté en Alsace puis en Lorraine, il perpétue le principe de défense en profondeur en ajoutant des lignes de défense composées d'ouvrages avancés (Faucherre, François, 1996). Même s'il a peu construit, Cormontaigne demeure un des rares ingénieurs à réaliser des travaux importants dans l'Est. Ses interventions à Strasbourg, Metz ou à Bitche se font toujours sur les traces de Vauban dont on le considère

héritier et émule. Le renom qu'il a acquis avec ces projets permet à ses idées d'être enseignées à l'École royale du génie de Mézières à partir de 1776. Connu sous le nom de front moderne, le système de Cormontaigne, est alors enseigné au même titre que les trois systèmes de Vauban jusqu'au début du XIXe siècle (Lombaerde, 2007).

IV.2.c. Conclusion sur les traités de fortification

Même si Vauban n'a pas théorisé sa production dans un traité, de nombreux travaux existent et rendent compte avec plus ou moins de brio de l'œuvre de l'illustre ingénieur. Malgré son implication dans la construction, ou du moins dans le remaniement, de bien des places fortes, Vauban n'est pas le seul ingénieur à être intervenu sur les fortifications du royaume retranscrites en plan-relief. D'autres hommes, peut-être avec plus de parcimonie, ont laissé leurs empreintes sur les défenses de nombreuses villes comme Cormontaigne en Lorraine. Expérimentés ou compilateurs, Allain Manesson Mallet, Le Blond et Bélidor ont écrit des ouvrages qui offrent une approche didactique et complète sur la discipline. Notre étude de ces traités de fortification et de leurs contenus est menée de manière à couvrir les travaux de Vauban ; aussi, pour les situations où des hommes autres que Vauban sont intervenus, nous traiterons les spécificités au cas par cas, à l'image de Metz ou Verdun où Cormontaigne a eu un rôle important sur les fortifications.

IV.3. Organisation des connaissances dans les traités de fortification

Après avoir défini un corpus de référence composé des traités de Mallet, Le Blond et Bélidor, encore faut-il l'analyser pour n'en retenir que les aspects pertinents pour notre projet de rétroconception. Notre analyse se limite aux contenus des traités de fortification retenus. Ceux-ci varient peu dans la structure et suivent généralement un même plan.

*« Fortification treatises generally began with an introduction to geometry and instruction on the construction and properties of polygonal figures, then proceeded to the design of the bastion, the section of the wall, and the complete polygonal wall system (the so-called trace). »*⁷⁹

(Lewis, 1994)

Tout d'abord, les notions de base de la géométrie euclidienne y sont rappelées, de la trigonométrie et notamment la construction de figures à la règle et au compas. On définit ensuite les parties de la fortification avant d'énoncer des principes immuables appelés maximes. Enfin, les systèmes des grands ingénieurs sont présentés et discutés (Bousquet-Bressolier, 2008). Dans la première partie du livre un de son traité et, après une brève introduction des origines des fortifications, Alain Manesson Mallet consacre plusieurs dizaines de pages à examiner les éléments géométriques nécessaires à la fortification. S'ensuit un chapitre complet sur la définition des composants de la fortification avant la présentation du système de l'auteur permettant la construction des places régulières, de leurs dehors, des citadelles, etc.

⁷⁹ Les traités de fortification commencent généralement par une introduction à la géométrie et des instructions sur la construction et les propriétés des figures polygonales, puis ils poursuivent avec le dessin des bastions, du profil du rempart et du système polygonal complet (appelé magistrale). (Traduction de l'auteur)

Dans les parties suivantes, nous abordons le problème de définir une terminologie unifiée pour une discipline qui n'a cessé d'évoluer (IV.3.a). La notion de système est présentée par le biais d'une autre notion majeure de la fortification : les maximes (IV.3.b). L'importance de la géométrie dans le tracé de ces systèmes est mise en avant dans la partie suivante (IV.3.c) avant d'illustrer en détail ces derniers points par les systèmes attribués à Vauban (IV.3.d). Il est ensuite rappelé dans la partie IV.3.e la mise en œuvre de processus de standardisation pour certaines constructions de fortification. Enfin, la dernière partie (IV.4) synthétise l'étude menée dans la partie IV.3 par la modélisation des connaissances propres à la géométrie en fortification bastionnée. Les conclusions qu'elle nous a permis d'établir y sont en particulier présentées.

IV.3.a. Le problème des définitions

Pendant trois siècles, la fortification bastionnée n'a cessé d'évoluer. Un vocabulaire prolifique en a résulté afin d'identifier et de définir l'abondance de constructions appartenant aux corps de place, aux dehors et aux ouvrages avancés – qui forment les ouvrages extérieurs – ou encore aux communications. Pour construire ces ouvrages et les positionner les uns par rapport aux autres, c'est aussi une multitude de règles de construction et de propriétés géométriques propres à la fortification bastionnée qui est mise en œuvre pour le dessin des angles, lignes et tracés.

La plupart des traités présentent, dès les premières pages, un chapitre de définitions des différentes parties de la fortification bastionnée. Par la multitude des sources et les trois siècles d'existence de la fortification bastionnée, les problèmes de normalisation du vocabulaire sont inévitables, ainsi que l'évolution terminologique. Le terme ravelin est par exemple synonyme de demi-lune, dans la réédition du *Dictionnaire de l'ingénieur* (Bélidor, Jombert, 1768) de Bernard Forest de Bélidor ; ouvrage qui constitue « la meilleure source pour le vocabulaire de la fortification » (Pérouse de Montclos et al., 2011), pourtant, certains auteurs de traités en font un ouvrage apparenté à la demi-lune, mais situé devant le bastion et non pas devant la courtine. Le second flanc sert également à désigner deux réalités différentes selon l'époque. Retranchement pratiqué derrière son premier flanc pour de Ville, le second flanc est aussi le synonyme du feu de courtine : une partie de la courtine comprise entre le prolongement de la face du bastion et l'angle du flanc. Aussi, nous nous en tiendrons principalement aux définitions fournies par le dictionnaire de Bélidor pour identifier les différentes parties de la fortification bastionnée (en annexe générale).

IV.3.b. Les maximes et les systèmes

« Le refus d'un modèle théorique, les maximes devant guider, mais non contraindre [...] Vauban est bien l'héritier, en ce sens, d'Antoine de Ville qui défendait l'unicité de chaque place forte et la variabilité des paramètres. »

(Virol, 2003)

Les maximes forment un ensemble de principes, de prescriptions exprimant un certain nombre de propriétés que doit respecter une place forte pour être efficace. Ces commandements sont généralement

ordonnés, aussi bien généraux que concrets et chiffrés. La première maxime d'Alain Manesson Mallet et la troisième de Cormontaigne définissent la longueur maximale des côtés du polygone englobant l'enceinte de ville. Dans *Les travaux de Mars ou l'art de la guerre*, Manesson Mallet enjoint « que le plus grand côté des places régulières n'excède pas l'étendue de la portée ordinaire du mousquet, qui est de 120 toises, afin que les bastions, qui seront construits à leurs extrémités, ne soient pas hors de défense. » Par cette maxime, on entend fixer la longueur de la ligne de défense, ligne immatérielle issue de l'angle du flanc et rejoignant l'angle flanqué opposé. L'angle flanqué du bastion b (Figure 65) demeure à portée de l'artillerie postée sur les flancs des bastions voisins a et c.

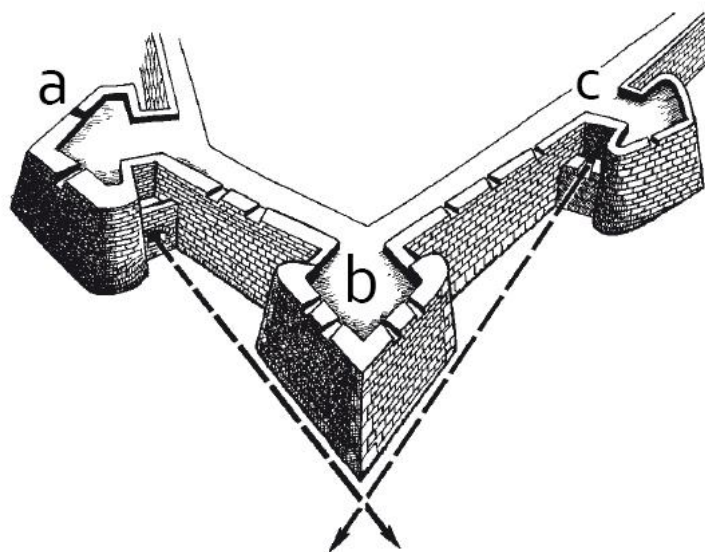


Figure 65 Principe du flanquement des faces d'un bastion b grâce aux flancs des bastions opposés a et c. Les lignes de défense en pointillé figurent la portée effective de l'artillerie qui est chargée de flanquer les faces du bastion.
Adapté de : Lepage, 2010

D'un ingénieur à l'autre, on retrouve souvent un tronc commun de maximes ayant trait aux mêmes éléments de fortification, telle que la longueur de la ligne de défense, mais pour lesquels la valeur de la propriété peut varier (notamment du fait de l'augmentation des portées de l'artillerie). Une des maximes essentielles et communes à la plupart des ingénieurs demeure assez générale : « qu'il n'y ait aucune partie de l'entour de la place qui ne soit flanquée du corps de la place. »

Les « systèmes ne seront point le résultat de déductions théoriques, mais l'application de principes très généraux à des situations très particulières. »

(Langins, 2007)

Pour mettre en pratique ces principes, les ingénieurs énoncent des méthodes de construction comparables à celles utilisées pour tracer les figures géométriques. L'ensemble des méthodes propres à un ingénieur forme, à l'image des ordres classiques, un « système cohérent de proportions modulaires et de formes appliquées en élévation » (Pérouse De Montclos, 2000), mais également en plan dans le cas de la fortification bastionnée. Le système est une « disposition particulière des diverses parties de l'enceinte d'une place de guerre, suivant les idées de son inventeur » (Bélidor, Jombert, 1768). Les proportions d'un

système, à savoir la disposition et le dimensionnement des différents ouvrages, sont déterminées par la construction et le calcul des flanquements et des défilements (Orgeix, 2009b), processus visant à :

- la création d'ouvrages capables d'assurer leur défense respective par le feu d'ouvrages voisins ;
- la protéger l'intérieur des ouvrages du feu ennemi.

Le Blond, dans *Elémens de Fortification* (1786), apporte quelques informations sur la quantité de systèmes existants alors (Figure 66). Il rapporte ainsi que l'italien Francesco de Marchi (1504 – 1575) estime être l'auteur de 161 systèmes tandis que Le Blond préfère le nombre de 200 systèmes principaux, tout ingénieur confondu et fruit d'une étude sérieuse menée par un auteur inconnu. Il distingue surtout les systèmes employés sur le terrain de ceux des « ingénieurs de cabinet, qui n'existent que dans les livres ».

IV.3.c. La géométrie

*« All fortifications consist of lines and angles, which have various names according to their various offices. »*⁸⁰

(Chambers, 1753)

Théorisé par Pagan, le principe d'échelonnement en profondeur de la défense en multipliant les ouvrages extérieurs est appliqué par Vauban. À Huningue, les fortifications vont atteindre une surface huit fois supérieure à celle de la ville elle-même (Faucherre, François, 1996). Malgré la démesure des tracés ainsi générés, le « système bastionné tient pour partie dans la capacité à conceptualiser la fortification comme un tout géométrique » (Lombaerde, 2007). Les systèmes produits par les différents ingénieurs ne sont que des méthodes de construction permettant de donner aux différents angles et lignes des valeurs respectant les maximes de chaque ingénieur (Figure 68).

L'examen d'aptitude précédant la formation sur le terrain que met en place Vauban en 1697 porte sur la géométrie, la trigonométrie. Ce sont les connaissances essentielles, le socle de base (INHA et al., 2010). La plupart des systèmes présentés dans les traités commencent par faire état du tracé en plan d'un front bastionné, appelé également magistrale. « C'est cette ligne qui 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, 1786). Ce trait forme donc l'ossature initiale à partir de laquelle est tracé le système de fortification dans son entier. La magistrale permet seule de reconnaître l'ingénieur qui en est l'auteur.

⁸⁰ Chaque fortification consiste en des lignes et des angles, qui ont des désignations différentes selon leur emploi. (Traduction de l'auteur)



a	b	c
d	e	f
g	h	i
j	k	l

Figure 66. Quelques exemples de systèmes de fortification sur des maquettes théoriques :

- a. 1er système de Vauban (vers 1675), maquette réalisée en 1878-1879 (1/200) ;
- b. 2e système de Vauban (vers 1685), maquette réalisée en 1879-1881 (1/200) ;
- c. 3e système de Vauban (vers 1695), maquette réalisée en 1880-1882 (1/200) ;
- d. Système de Roussel 2 (1745), maquette réalisée vers 1750 (1/576) ;
- e. Système de Perdiguier (1720), maquette réalisée vers 1720 (1/600) ;
- f. Système anonyme espagnol, maquette réalisée au XVIIIe siècle ;
- g. Système de fortification de Turpin de Crissé (1760), maquette réalisée en 1760 (1/400) ;
- h. Système de Carnot aîné (1797) ; maquette réalisée en 1797 (1/375) ;
- i. Système anonyme suédois (XVIIIe siècle); maquette réalisée au XVIIIe siècle ;
- j. Système De Ville (1628), maquette réalisée en 1832 (1/200) ;
- k. Système de Pagan (1645), maquette réalisée en 1872-1873 (1/200) ;
- l. Système de Marolois (1614), maquette réalisée en 1872 (1/200).

Photos : Musée des Plans-reliefs / Bruno Arrigoni

Par exemple, pour réussir le tracé d'un front selon Pagan (Figure 68), il faut d'abord connaître la longueur du côté extérieur du polygone formant l'enceinte. De cette donnée dépendent les proportions des éléments suivants (perpendiculaire, face, ligne de défense). Du milieu d'un côté (CH) de 180 toises, on trace une perpendiculaire (KK') d'une longueur égale à 30 toises et ayant pour base le point situé au milieu du côté extérieur. On obtient la direction de la face, d'une longueur de 55 toises, et des lignes de défense (CF et EH) qui ont pour longueur $EK = KF = 32$ toises à partir de leur intersection (K) avec la perpendiculaire.

272 LES TRAVAUX DE MARS,

OU L'ART DE LA GUERRE. 273

CONSTRUCTION DES PLACES

FIGURE LXXXVI.

selon le Comte de PAGAN.

Pour tracer sa grande Fortification.

TIREZ la baze AB. de 200. toises, & la divisez en deux également au point D. puis tirez du point D. la ligne perpendiculaire DC. de 30. toises de longueur : Et ensuite les deux lignes de Défense partant l'une du point A. passant en C. & allant en N. & l'autre du point B. passant en C. & allant en M. toutes deux de raisonnable longueur.

Cela fait, marquez sur lesdites lignes de Défense les deux Faces des Bastions AE. & BF. de 60. toises chacune : Puis les complemens des deux lignes de Défense CM. & CN. l'un & l'autre de 37. toises. Et ensuite tirez les deux lignes des Flancs de E. à M. & de F. à N. & la ligne de la Courtine de M. à N.

Ainsi vous tracerez tres-facilement, & avec autant de diligence que de justesse, toutes les Faces de la grande Fortification, en observant toujours la même règle sur les bazes de 200. toises, dont les principales parties seroient :

Les deux Faces des Bastions AE. & BF. 60. toises : les deux Flancs EM. & FN. de 24. toises & deux pieds : la Courtine MN. de 70. toises & 5. pieds : les lignes de Défense MCB. & NCA. de 141. toises & 2. pieds chacune : & l'Angle flanquant ACB. de 146. degr. & 36. minutes.

Mais quant aux Angles des Bastions & des Polygones, ils se trouveront en cette maniere. Otez de l'Angle flanquant de la Fortification l'Angle du Centre du Polygone, & vous aurez les Angles des Bastions dudit Polygone : puis prenez le complement au Demi-cercle de l'Angle du même Centre pour les Angles du Polygone formez par les côtes ou bazes de 200. toises autour de la Circonférence du Cercle.

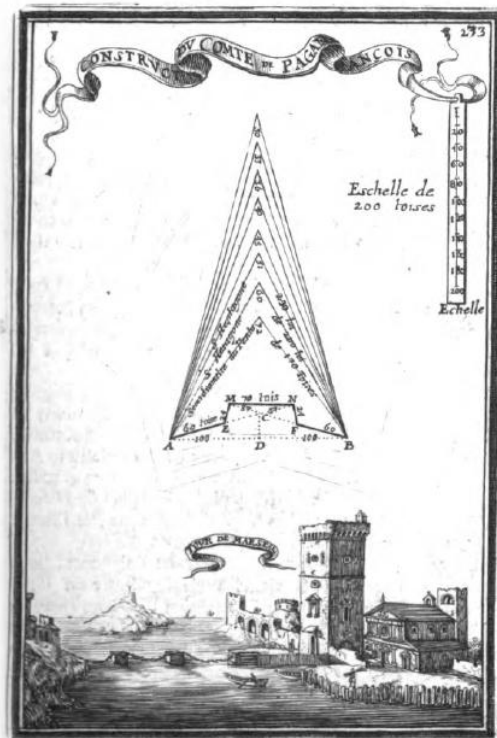


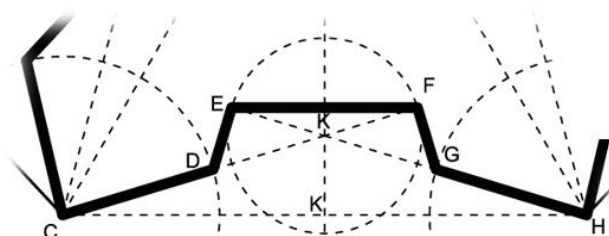
FIGURE LXXXVI.

Tome II.

S

Figure 67. Règles de construction pour le tracé de la magistrale de Pagan telles qu'énoncées par Alain Manesson Mallet dans son traité.

Source : Manesson Mallet, 1691



	Grande	Moyenne	Petite
CH	200 toises	180 toises	160 toises
K'	1/2 CH	1/2 CH	1/2 CH
KK'	30 toises	30 toises	30 toises
CD = GH	60 toises	55 toises	50 toises
KE = KF	37 toises	32 toises	27 toises

Figure 68. Interprétation des règles de construction pour le tracé de la magistrale de Pagan telles qu'énoncées par Alain Manesson Mallet.

Source : Auteur

IV.3.d. Les trois systèmes de Vauban

« 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. »

(Orgeix et al., 2007)

L'élaboration de système n'est pourtant pas l'œuvre unique de néophytes, de profanes ou d'opportunistes. Des ingénieurs ont proposé leurs propres systèmes à l'image de Cormontaigne, dont les propositions sont très proches de celles de Vauban (Langins, 2007). La fondation de l'École de Mézières en 1748 apparaît comme un tournant dans l'importance accordée aux systèmes avec en particulier la nécessité d'établir un cadre formel. Cormontaigne, grâce à la dimension pédagogique de ses nombreux travaux et l'influence considérable de l'œuvre de Vauban sur la sienne, pourvoit à l'absence de cours théoriques. Le premier système de Vauban (Figure 70) est proche de celui de Pagan : polygone régulier tant que le terrain le permet avec pour points forts de la défense : les bastions. Vauban y ajoute des ouvrages extérieurs comme les tenailles et les demi-lunes. Chaque face de bastion est protégée par le feu provenant des flancs des bastions voisins et les courtines sont couvertes par le feu des flancs collatéraux. C'est la notion de minimum de courtine qui intervient ici : elle définit la distance minimale nécessaire entre deux bastions pour supprimer l'angle mort au milieu de la courtine qu'ils encadrent (Figure 69).

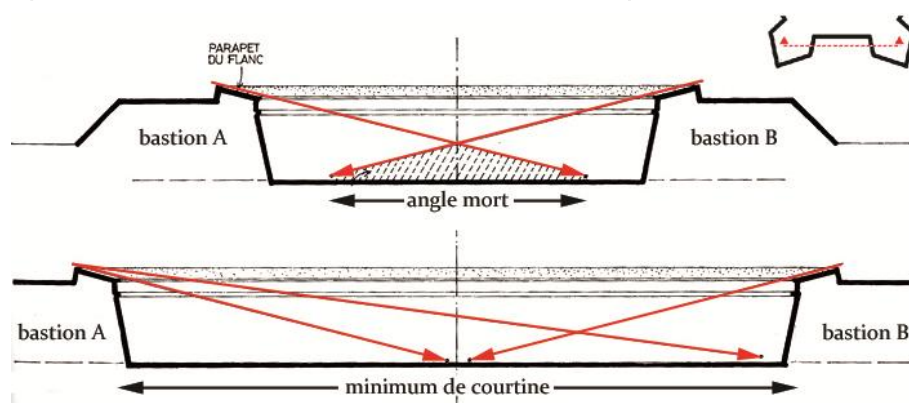


Figure 69 Coupe devant une courtine : « Les feux des deux flancs se croisent devant la courtine ».

D'après : Faucherre, François, 1996

Le second système de Vauban (Figure 70), mis en œuvre à Belfort, à Landau et en partie à Besançon est composé de deux enceintes. Celle qui est extérieure est dite de combat. Elle est constituée de bastions détachés situés devant des tours bastionnées tandis que l'enceinte de sûreté, intérieure est chargée de la défense rapprochée. Cela permet à Vauban de pallier les défauts du précédent système en séparant les ouvrages destinés à la protection rapprochée de ceux destinés aux tirs éloignés. Le dernier système (Figure 70), utilisé uniquement à Neuf-Brisach, est un perfectionnement du deuxième système avec la mise en place de courtines bastionnées et de réduits dans les demi-lunes.

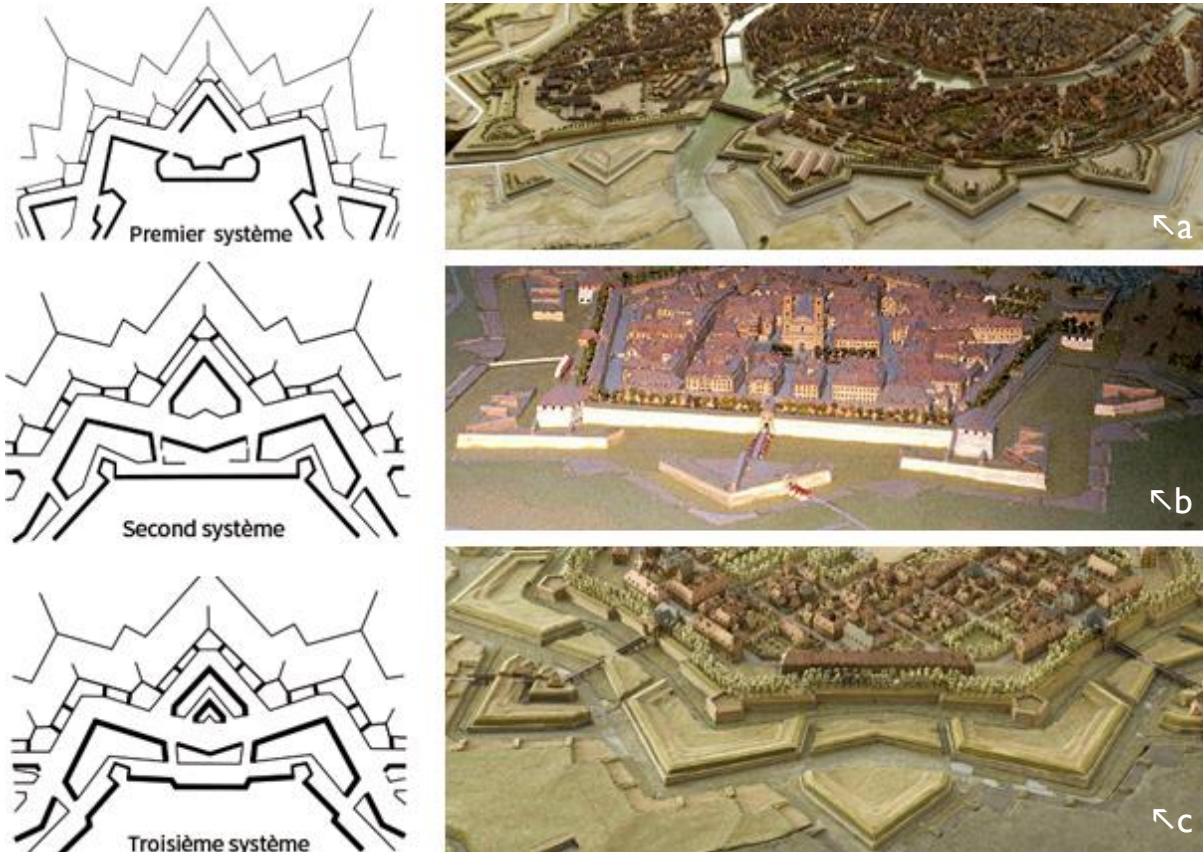


Figure 70 Systèmes théoriques attribués à Vauban et exemples d'application sur les villes de Strasbourg (a), Belfort (b) et Neuf-Brisach (c) à travers leurs plans-reliefs respectifs.

Photos : Monuments historiques / J. Marx et © RMN-Grand Palais / René-Gabriel Ojéda
 Illustrations : Serge François

IV.3.e. Standardisation et modularité des édifices militaires

Même si les places fortes sont conçues pour être tenues par une fraction des effectifs déployés par l'armée assaillante, de nombreux édifices logistiques sont nécessaires pour le logement, le soin et même le culte. Ainsi, hôpitaux, casernes et églises sont construits de concert avec les fortifications. Par souci de contrôle sur les délais d'exécution, du programme et du budget, Vauban met en place des plans types préétablis modulables des différents bâtiments militaires que peut accueillir une place. La proximité des matériaux et la maîtrise de certaines pratiques constructives sont les seuls éléments venant briser cette monotonie. Les besoins en équipements sont calculés en fonction de l'effectif type d'un bastion qui est estimé à 700, soldats et cavaliers confondus (Lombaerde, 2007 ; Lepage, 2010).

Vauban met en œuvre un certain nombre d'ouvrages standardisés et modulables (Faucherre et al., 2007) La poudrière est un standard absolu qui varie selon la capacité désirée. Placée généralement dans un bastion creux, on s'attache à sécuriser cette construction critique par, à l'extérieur, l'ajout d'un mur de confinement et de lourds contreforts. Les casernes sont modulables. Un module est composé de deux cages d'escalier autour d'un mur de refend, quatre chambrées de huit hommes sur deux niveaux (Figure 71, a). Quand le terrain est en pente, les travées sont alors en gradins (Figure 71, b). Les églises ou les chapelles destinées à la communauté militaire présentent souvent de nombreux points communs : plan rectangu-

laire, simple comble et clocher (qui fait aussi office de poste de guet) au-dessus de l'entrée. Parmi les autres ouvrages standardisés, on peut évoquer, les guérites, les corps de garde, les puits, les arsenaux, les portes, les redoutes et les phares.

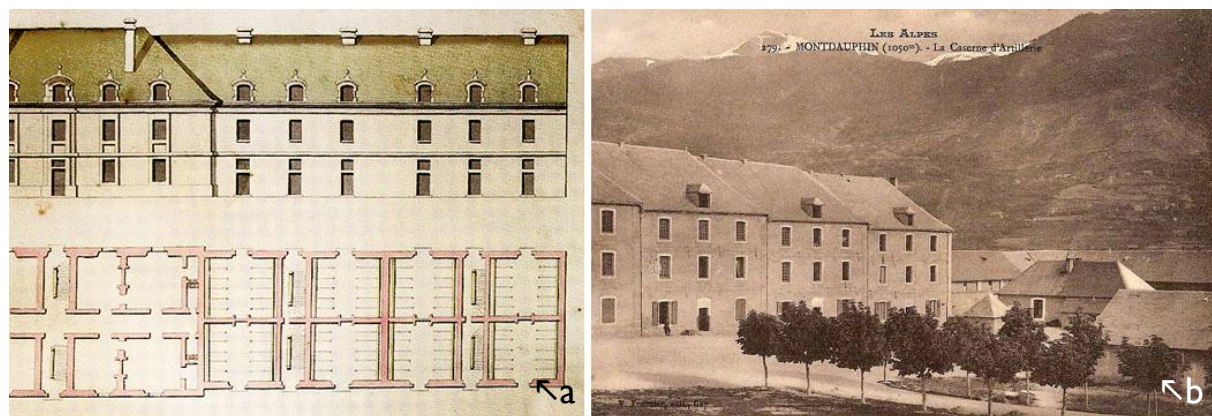


Figure 71. Élévation et plan d'une caserne avec le pavillon des officiers (a) et la caserne Binot de Mont-Dauphin construite après 1700.

D'après : Orgeix et al., 2007 / Photo : V. Fournier

IV.4. Modélisation de la connaissance sur la fortification bastionnée

Cette dernière partie propose d'établir un modèle de connaissance des fortifications bastionnées. L'ontologie que nous présentons rend compte des différents concepts abordés précédemment. Elle a pour principal objectif d'identifier et d'organiser la connaissance sur les systèmes et ouvrages de fortification que nous avons pu rencontrer lors de l'analyse du corpus de traités de fortifications retenus⁸¹. Outre ces sources, nous pouvons compléter notre modélisation par des textes plus récents qui formalisent, de manière synthétique, les connaissances relatives à la fortification bastionnée.

Nous nous intéressons tout d'abord aux classifications existantes sur le domaine de la fortification bastionnée (IV.4.a) afin de dégager un premier modèle de connaissance nous permettant de recenser les différents ouvrages défensifs. Cette synthèse permet de mettre en évidence différentes logiques constructives régissant la création de ces ouvrages (IV.4.b). Parmi ces modes de construction, nous nous attardons sur les ouvrages de fortification construits par balayage d'un profil le long d'une trajectoire. Une fois les raisons de cet intérêt explicitées, les spécificités de ce type d'ouvrage sont étudiées avant que ne soient détaillés les principes de construction de ces mêmes tracés (IV.4.c).

IV.4.a. Classification hiérarchique des ouvrages

La structure communément établie aujourd'hui (Faucherre, François, 1996 ; Pérouse de Montclos et al., 2011) est une division des ouvrages de fortification bastionnée en quatre groupes (Figure 72). Le premier groupe est composé de l'ensemble des ouvrages formant fortification continue autour de la place forte tels que les bastions et les courtines. Le second groupe est constitué des ouvrages extérieurs. Parmi les

⁸¹ cf. Figure 157. Diagramme de classe UML représentant les ouvrages de fortification bastionnée et leurs relations., page 235

ouvrages extérieurs, on distingue ceux du dehors et les avancés, mais qui partagent tous le fait d'être fortifiés uniquement du côté de la campagne (demi-lune, tenaille, chemin couvert, flèche, etc.), les ouvrages avancés se situant au-delà du chemin couvert. Le troisième groupe regroupe les ouvrages du fossé tandis que le dernier groupe est composé des ouvrages de communication qui relient les différents ouvrages fortifiés.

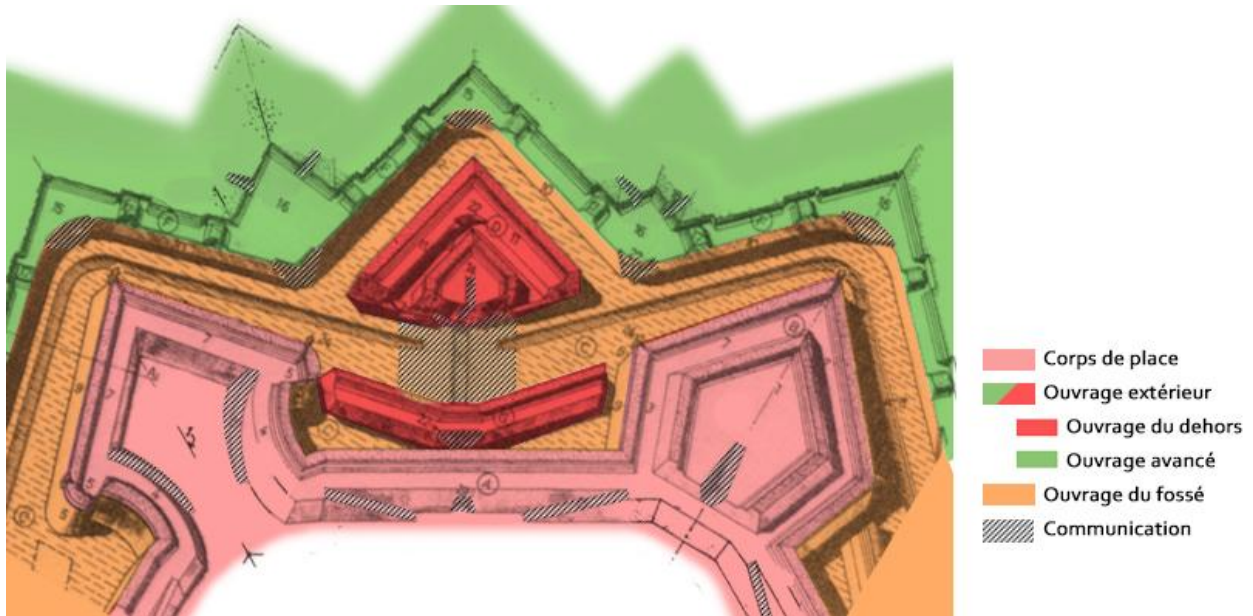


Figure 72. Principaux groupes d'ouvrages fortifiés.
D'après: S. François, 1985

À ces quatre groupes, on peut également ajouter un groupe composé d'ouvrages secondaires comme les dames : obstacles en forme de tourelle empêchant le passage ; les guérites : abris aménagés aux angles saillants pour protéger une sentinelle ; ou les traverses : des murs ou des massifs de terre qui nécessitent la présence d'un ouvrage fortifié support pour être construits (Figure 73, a).

Autres constructions de fortification bastionnée, les édifices militaires regroupent l'ensemble des constructions et des bâtiments destinés à l'usage des militaires. On y retrouve les arsenaux, les casernes, les citernes, les corps de garde, les poudrières, les puits, mais aussi les hôpitaux et les églises (Figure 73, b). Ces édifices ont pour caractéristique commune d'être standardisés comme nous l'avons déjà établi dans la partie IV.3.e.

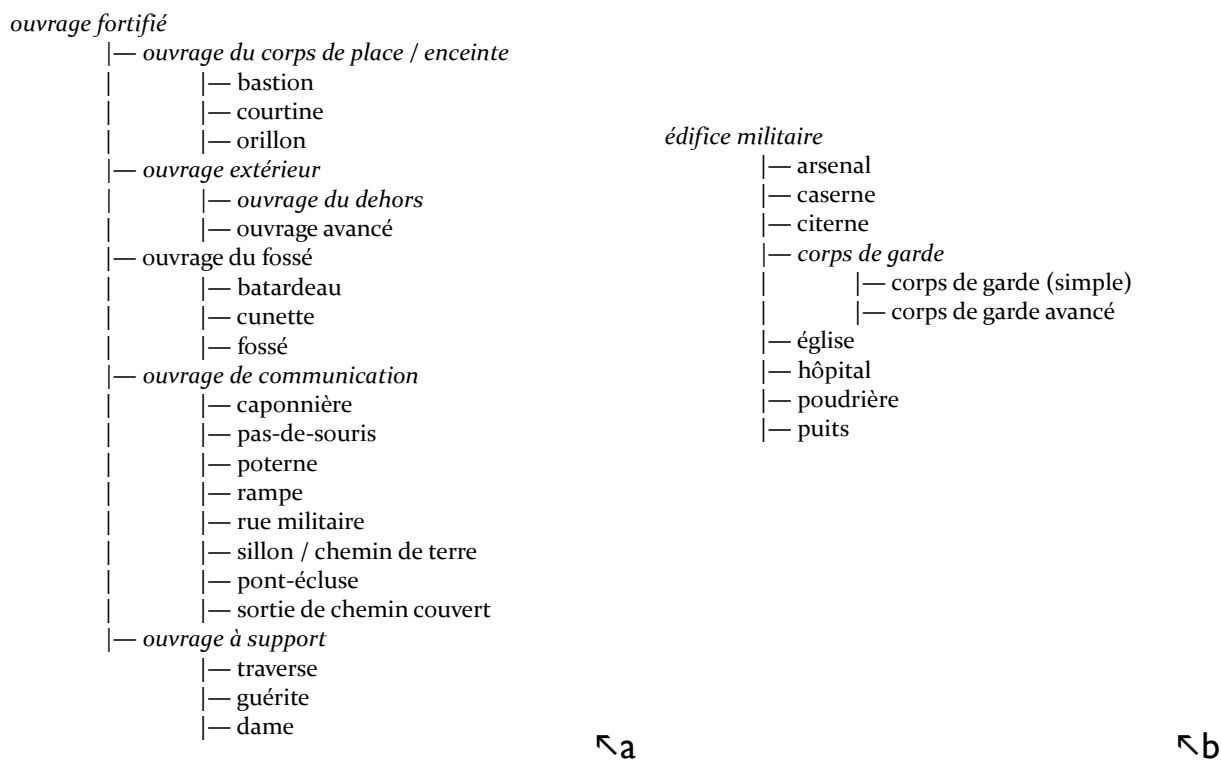


Figure 73. Classement partiel des ouvrages de fortification bastionnée : les ouvrages fortifiés (a) et les édifices militaires (b). Une version plus exhaustive est présentée en annexe, page 269.

IV.4.b. Conséquences sur la modélisation géométrique

La classification précédente a permis de regrouper les ouvrages de fortification bastionnée selon leur situation spatiale dans le système fortifié. Les groupes qui en résultent partagent également d'autres caractéristiques d'ordre géométrique sur des différences dans le mode de construction des ouvrages. Ainsi, du point de vue la modélisation géométrique, nous pouvons distinguer trois types d'ouvrages : les ouvrages à trajectoire (demi-lunes, des fronts tenaillés ou bastionnés, etc.), les ouvrages à révolution (guérite, dame, etc.) et les ouvrages sans trajectoire (corps de garde, caserne, etc.).

Ces derniers sont composés essentiellement d'édifices militaires standardisés. De plus, ces constructions, que l'on retrouve d'une place forte à l'autre, et même au sein d'une place forte, sont conçues de manière modulable : le nombre de trames d'une caserne peut varier en fonction de la taille d'une place par exemple (Figure 71). La standardisation et la modularité sont deux critères favorables à une approche telle que définie en partie II.1, page 99. On trouve également parmi les ouvrages sans trajectoire, de nombreux ouvrages de communication et les embrasures. À l'image des autres ouvrages sans trajectoire, les embrasures possèdent des paramètres propres tels que définis dans le diagramme de classes suivant (Figure 74).

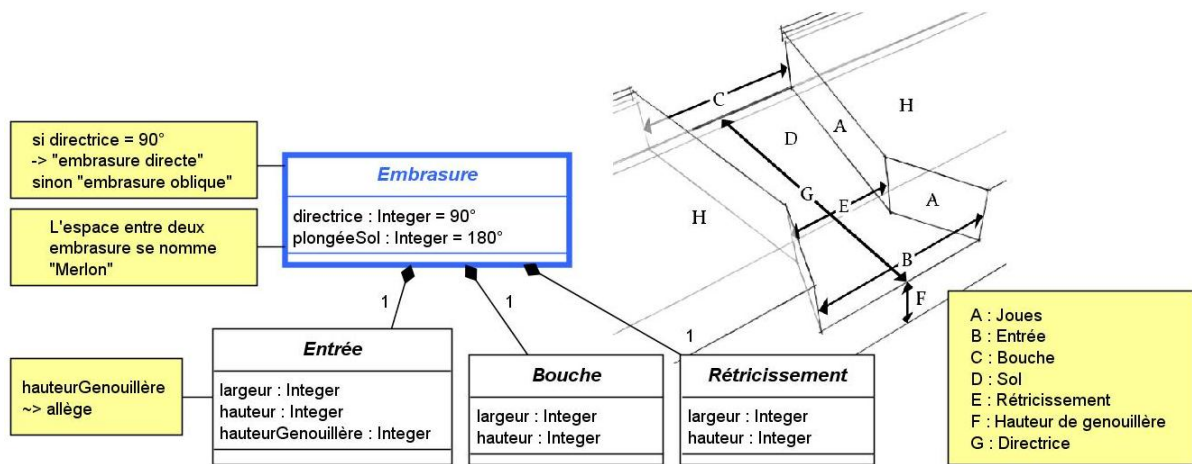


Figure 74. L'embrasure est une ouverture pratiquée dans un parapet pour permettre le tir.

Les ouvrages à révolution sont peu nombreux. Jusqu'à présent, deux seulement ont été identifiés. Il s'agit des dames et des guérites : des ouvrages secondaires qui nécessitent un ouvrage fortifié support principal pour être construit (les batardeaux et les bastions respectivement). Leur modélisation géométrique repose sur un profil tournant autour de l'axe vertical.

Enfin, les ouvrages à trajectoires, auxquels nous allons consacrer la dernière partie de ce chapitre, constituent l'essentiel des ouvrages de fortification identifiés. La plupart des ouvrages du corps de place, ainsi que les ouvrages du dehors et des avancés appartiennent à cette dernière catégorie. En se basant sur le corpus d'ouvrages que nous avons pu identifier, on estime à 80 % la proportion d'ouvrages construits par balayage. À l'image des bastions cités ci-dessus, chaque ouvrage à trajectoire peut être interprété comme la combinaison d'un tracé polygonal (ouvert ou fermé) et d'un profil d'ouvrage.

IV.4.c. Les ouvrages à trajectoires

Pour la modélisation tridimensionnelle d'ouvrages appartenant au groupe des ouvrages à trajectoires, trois paramètres sont nécessaires. Le tracé polygonal est, du point de vue géométrique, la trajectoire ou génératrice (Figure 75, A), sur laquelle est balayé un profil (Figure 75, B) et qui permet de donner naissance à un objet en trois dimensions. La trajectoire et le profil constituent ainsi les deux premiers paramètres du balayage pour l'opération de création des ouvrages du corps de place et des ouvrages extérieurs. Les parties IV.4.c.a et IV.4.c.b développent les caractéristiques de ces tracés 2D.

Alors que les ouvrages extérieurs ne sont fortifiés que partiellement, l'enceinte est un cas particulier puisque c'est le seul ouvrage dont la trajectoire est un tracé polygonal fermé. Lorsque la ligne polygonale de la trajectoire est ouverte, un troisième paramètre, la gorge (Figure 75, C), est nécessaire pour définir la géométrie aux extrémités du balayage, car le profil n'est pas toujours orthogonal à la trajectoire à ces points (IV.4.c.c).

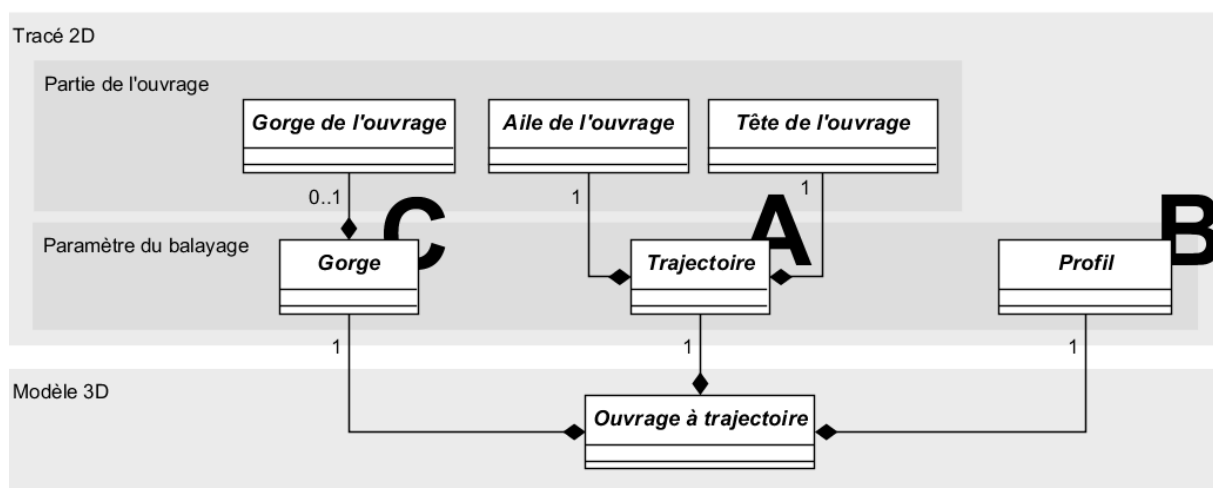


Figure 75. Diagramme de classe UML synthétisant les différents objets nécessaires à la modélisation 3D d'un ouvrage à trajectoire

IV.4.c.a. La trajectoire

En fortification bastionnée, la trajectoire est connue sous le nom de magistrale. Essentiellement utilisé pour les ouvrages du corps de place (l'enceinte), le terme magistrale est également utilisé par certains auteurs de traités pour décrire le tracé des ouvrages extérieurs comme la demi-lune. Le tracé de la trajectoire permet de modéliser :

- la tête de l'ouvrage, c'est-à-dire le côté de l'ouvrage tourné vers la campagne : celle qui fait face à l'ennemi (Figure 76, 1), mais aussi ;
- les ailes de l'ouvrage, c'est-à-dire les parties latérales de certains ouvrages du dehors et des avancés (Figure 76, 2).

Le diagramme UML suivant décrit les différents objets composant la trajectoire (Figure 77)⁸², ainsi que leurs propriétés et leurs relations. L'aile et la tête de l'ouvrage forment les deux parties de la trajectoire. La tête peut présenter une grande variété de formes, car les ingénieurs militaires sont à l'origine d'une quantité importante d'ouvrages à trajectoire que l'on peut distinguer selon les segments formant la tête de l'ouvrage. Ces segments sont au nombre de trois : courtine, face et flanc. Un ouvrage dont la trajectoire forme un front bastionné au niveau de la tête est construit de deux demi-bastions – chacun composé d'une face et de son flanc (formant l'angle de l'épaule) – reliés par une courtine (Figure 76, a). Pour la plupart des ingénieurs, la ligne de défense, distance séparant le sommet formant l'angle de l'épaule au sommet de l'angle formé par le demi-bastion opposé, ne doit pas dépasser 120 toises : la portée maximale du mousquet et la 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 déterminés par des contraintes défensives à l'image de tous les ouvrages de fortification bastionnée. Outre le front bastionné, les deux typologies de têtes d'ouvrages sont le front tenaillé (Figure 76, b) dans lequel les faces forment un angle rentrant et le bastion dans lequel les faces forment un angle saillant (Figure 76, c).

⁸² cf. Diagramme de classes UML décrivant la modélisation des ouvrages à trajectoire., page. 232

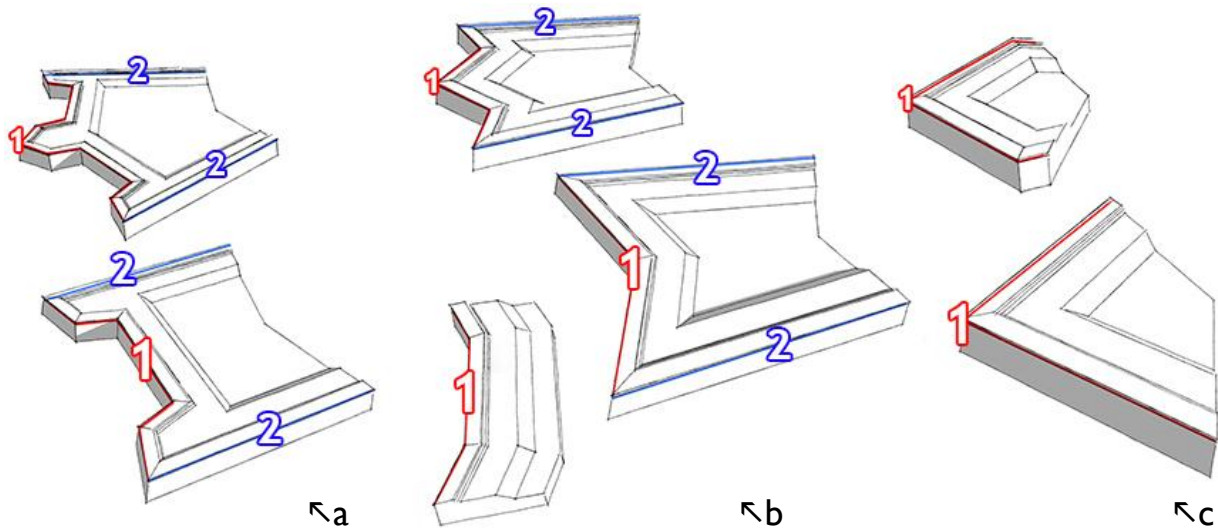


Figure 76. Les différentes têtes d'ouvrages rencontrées : front bastionné (a), le front tenaillé (c) et le bastion (c). Le tracé 1 en rouge matérialise la portion de trajectoire appartenant à la tête d'ouvrage tandis que le tracé 2 en bleu correspond à la portion appartenant aux ailes de l'ouvrage. Ailes de l'ouvrage et têtes de l'ouvrage forment la magistrale ou la trajectoire du point de vue de la modélisation géométrique.

Dans la partie IV.3.c, nous montrions que les systèmes produits par les différents ingénieurs ne sont que des méthodes de construction permettant de donner aux différents angles et lignes des ouvrages de fortification bastionnée des valeurs satisfaisant des contraintes défensives. Cet ensemble de lignes et d'angles⁸³ forme un tracé régulateur (Figure 78, a) qui est le moyen de « contrôler les proportions et la position des éléments »⁸⁴ à la base des ouvrages du corps de place et des ouvrages extérieurs. Ces systèmes sont donc uniquement destinés à la construction des ouvrages que nous avons identifiés comme résultants du balayage d'un profil le long d'une trajectoire.

Cependant, il faut préciser que la construction des trajectoires dépend généralement d'une trajectoire déjà construite. Les trajectoires sont construites de manière successive, depuis la place forte vers la campagne. Par exemple, la trajectoire de la tenaille et de la demi-lune (Figure 78, b, 2), des ouvrages qui se situent immédiatement devant les courtines, sont construites à partir du front qui la commande, c'est-à-dire qui le domine (Figure 78, b, 1). Ces trajectoires de niveau 1 et 2 viennent ensuite alimenter des géométries de références nécessaires au tracé des trajectoires de niveau 3. Dans le cas de la Figure 78, ce processus est répété jusqu'au niveau 6, pour tracer la trajectoire du chemin couvert. La construction de cet ouvrage dépend directement d'une couronne (4) et ses demi-lunes (5), ainsi que du front principal (1).

⁸³ Pour une liste plus complète : se référer à la partie 1)g) : Tracés notables, page 224

⁸⁴ "They were seen previously in the discussion of the Golden Section, but they can also be used to control the proportion and placement of elements in other proportioning systems as well (Ching, 2012)."

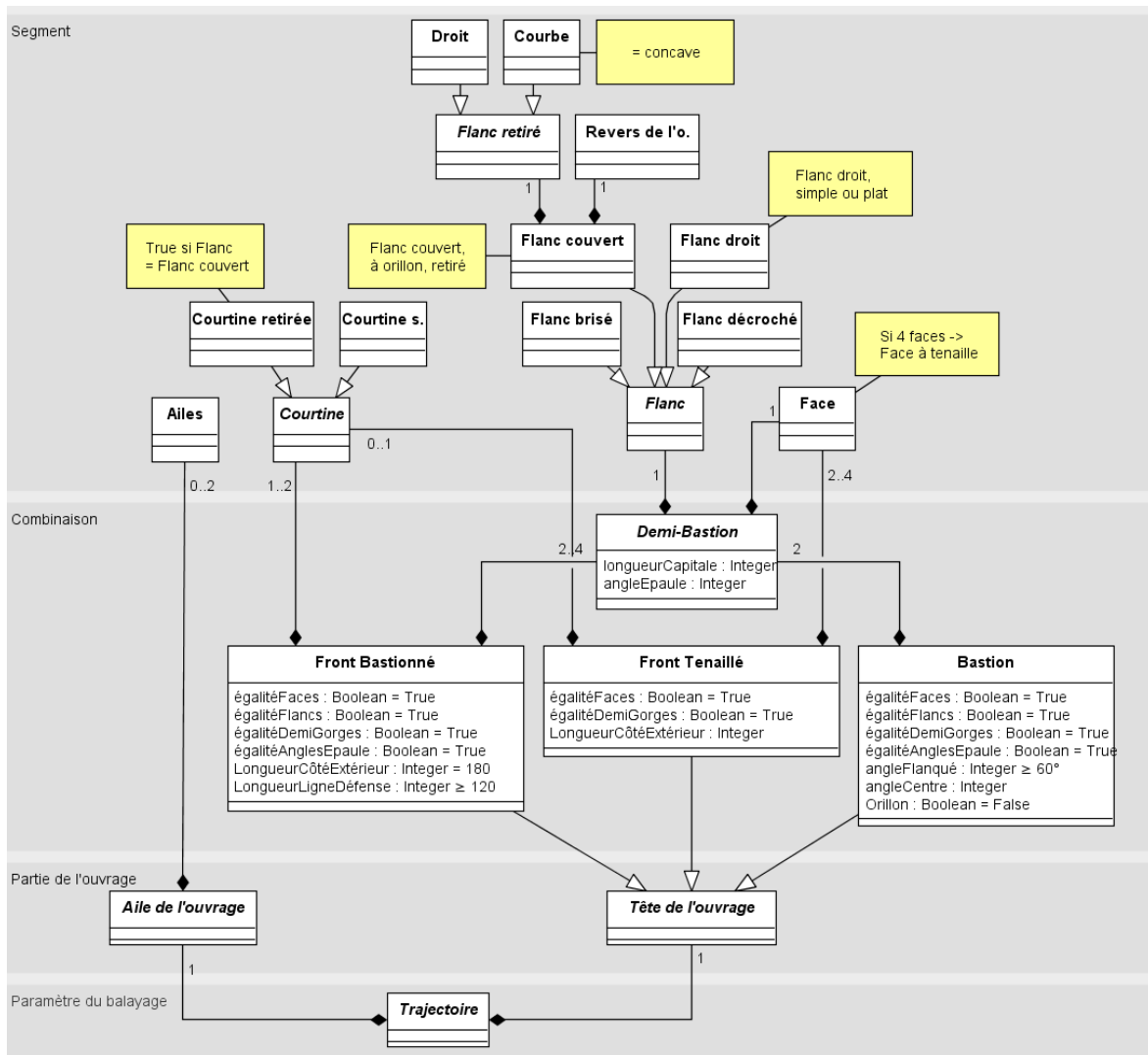


Figure 77. Diagramme UML décrivant les différents objets nécessaires à la construction de la trajectoire des ouvrages.

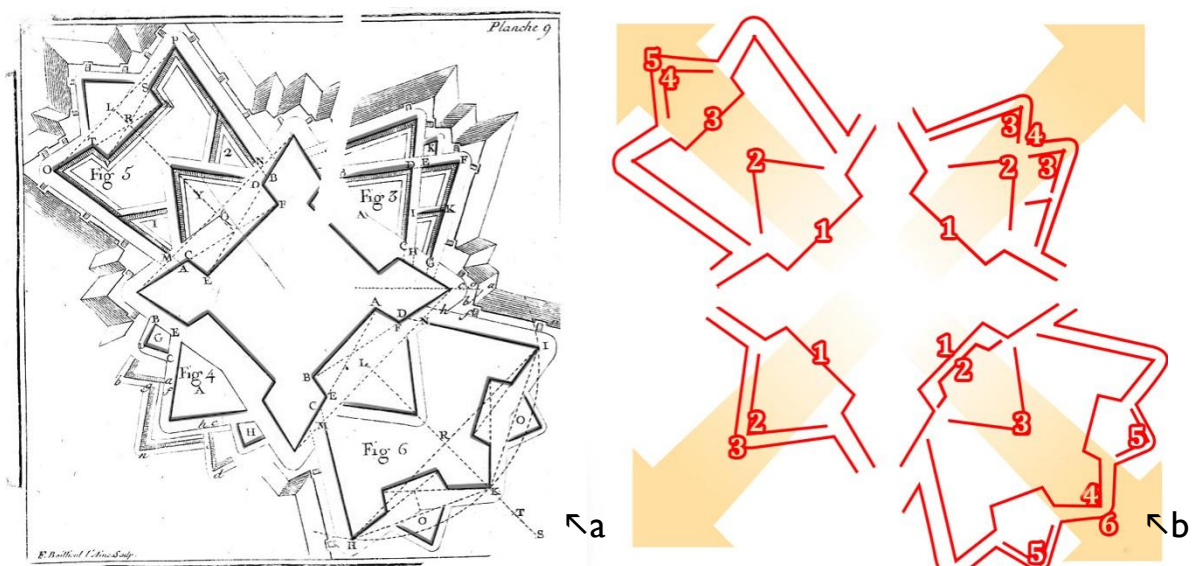


Figure 78. Tracé régulateur d'une place théorique (a) et ordre de construction des trajectoires des différents ouvrages (b).
D'après : Le Blond, 1786

IV.4.c.b. Le profil

Le profil des ouvrages à trajectoire est constitué de deux tracés : le rempart et l'escarpe (Figure 79). Bien que ces termes soient généralement réservés à l'usage de l'enceinte, ils peuvent être généralisés aux autres ouvrages à trajectoire pour décrire les différentes parties nécessaires au profil. L'escarpe est la paroi du fossé du côté de l'ouvrage. Le mur d'escarpe est relié au rempart par l'intermédiaire du cordon, une moulure semi-circulaire. Le rempart est composé des tracés des éléments suivants :

- Le parapet qui est un mur composé d'un talus intérieur, d'une plongée et d'un talus extérieur.
- Le terre-plein qui est aussi taluté et sur lequel repose le parapet.
- De manière optionnelle, on trouve une ou de plusieurs banquettes qui sont des plateformes de tir pour l'infanterie.

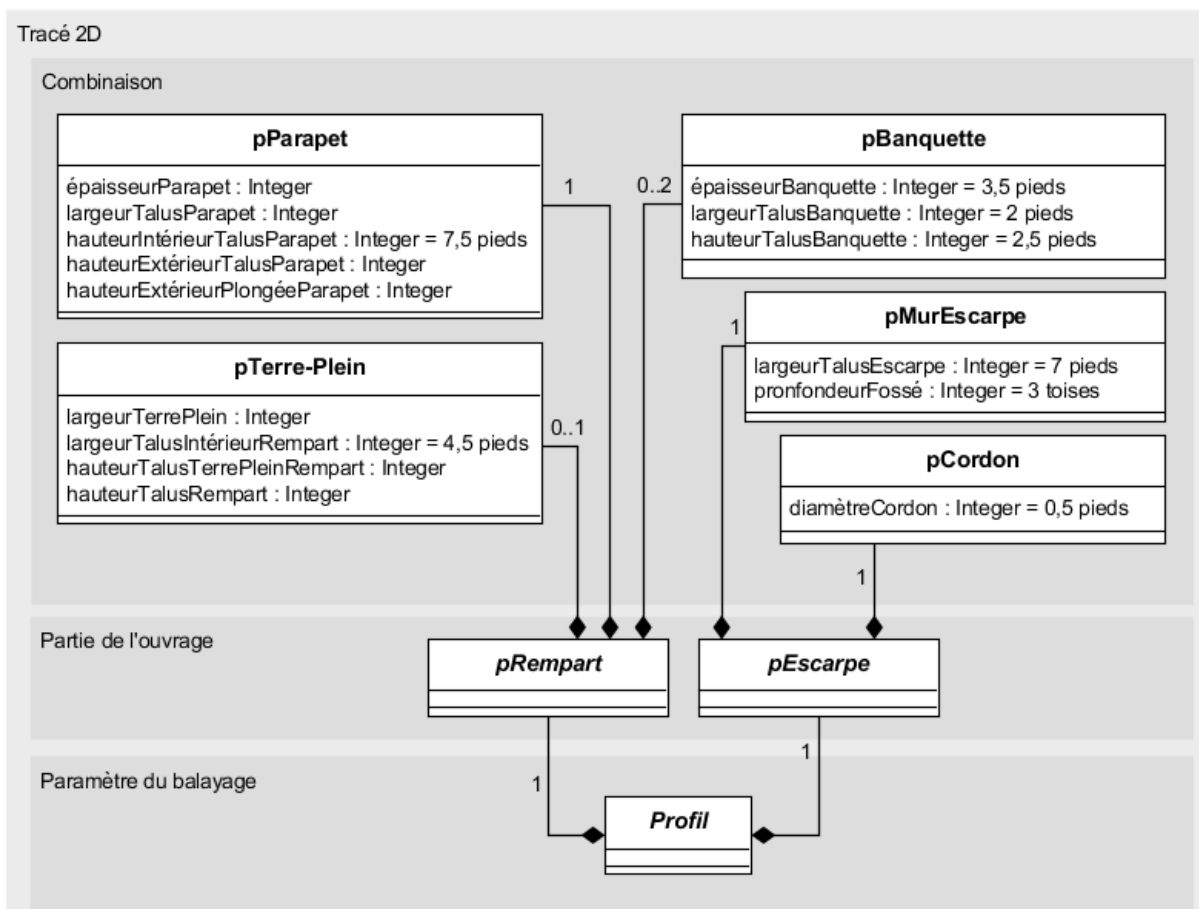


Figure 79. Diagramme UML décrivant les différents objets nécessaires à la construction du profil des ouvrages à trajectoire⁸⁵.

⁸⁵ cf. Figure 156. Diagramme de classes UML décrivant la modélisation des ouvrages à trajectoire., page 233

IV.4.c.c. La gorge

À l'exception de l'enceinte, les ouvrages extérieurs, aussi bien les ouvrages du dehors que les ouvrages avancés, nécessitent un troisième paramètre pour leur construction en trois dimensions par l'opération de balayage. Dans la Figure 80, le profil (en rouge) permet de tracer la trajectoire d'une demi-lune. La gorge de cet ouvrage, c'est-à-dire la partie tournée vers la place peut être dessinées selon trois configurations sont possibles qui sont l'angle rentrant (Figure 80, a), l'angle sortant (Figure 80, b) et l'angle plat (Figure 80, c).

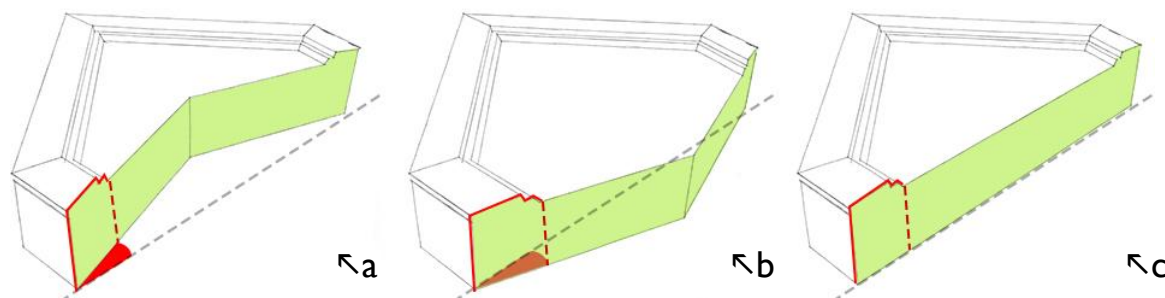


Figure 80. Différente configuration pour l'extrémité du balayage en fonction du tracé de la gorge: en angle rentrant (a), en angle sortant (b) ou droit (c).

IV.4.d. Traités de fortification bastionnée et modèle de connaissance

Les traités de fortification bastionnée font partie d'un courant littéraire dont les textes les plus connus et les plus étudiés sont les traités d'architecture classique. Pendant près de deux siècles pourtant, une grande quantité de traités d'architecture militaire est parue, mais peu d'études sur leurs contenus ont été menées. Au regard des objectifs de notre projet de reconstruction des fortifications présentes sur les plans-reliefs, ces documents sont une manne, car ils présentent de manière encyclopédique la fortification bastionnée. L'analyse que nous avons menée sur une sélection de traités nous a permis de mettre en évidence les principes et les règles de construction à l'origine des vastes systèmes fortifiés de l'époque moderne. Ces systèmes reposent notamment sur une grande variété d'ouvrages appartenant aux ouvrages du corps de place (bastion, orillons, etc.) et aux ouvrages extérieurs (demi-lune, ouvrage à corne, redan, etc.). Leur construction nécessite le dessin de tracés qui, du point de vue de la modélisation géométrique, ne sont rien d'autre que des trajectoires pour le balayage de profils.

La reconstruction de ces tracés à partir des données relevées lors de l'acquisition tridimensionnelle constitue l'enjeu premier pour la rétroconception des fortifications bastionnées présentes sur les plans-reliefs puisqu'ils nous permettent de disposer du paramètre principal de l'opération géométrique de balayage. Dans le prototype proposé dans le chapitre suivant, différents algorithmes de création de trajectoires, d'ajustements et de segmentation sont implémentés, puis expérimentés sur les données issues de l'acquisition dans le but de valider notre approche de rétroconception.

Chapitre V. Prototype et expérimentation pour la reconstruction des fortifications des plans-reliefs.

Après que l'étude des traités d'architecture militaire nous a permis de mettre en évidence la méthode de construction des principaux ouvrages de fortification bastionnée, un modèle de connaissance précisant les règles qui régissent leur modélisation géométrique a pu être défini. Ainsi, la troisième étape de notre proposition nous permet de poursuivre par l'implémentation des trajectoires d'ouvrages (Figure 81, a) et de leur ajustement (Figure 81, b). Par la suite, l'implémentation d'algorithmes de segmentation sémantique s'appuyant sur cette même ontologie rendra automatique la reconstruction des trajectoires (Figure 81, c).

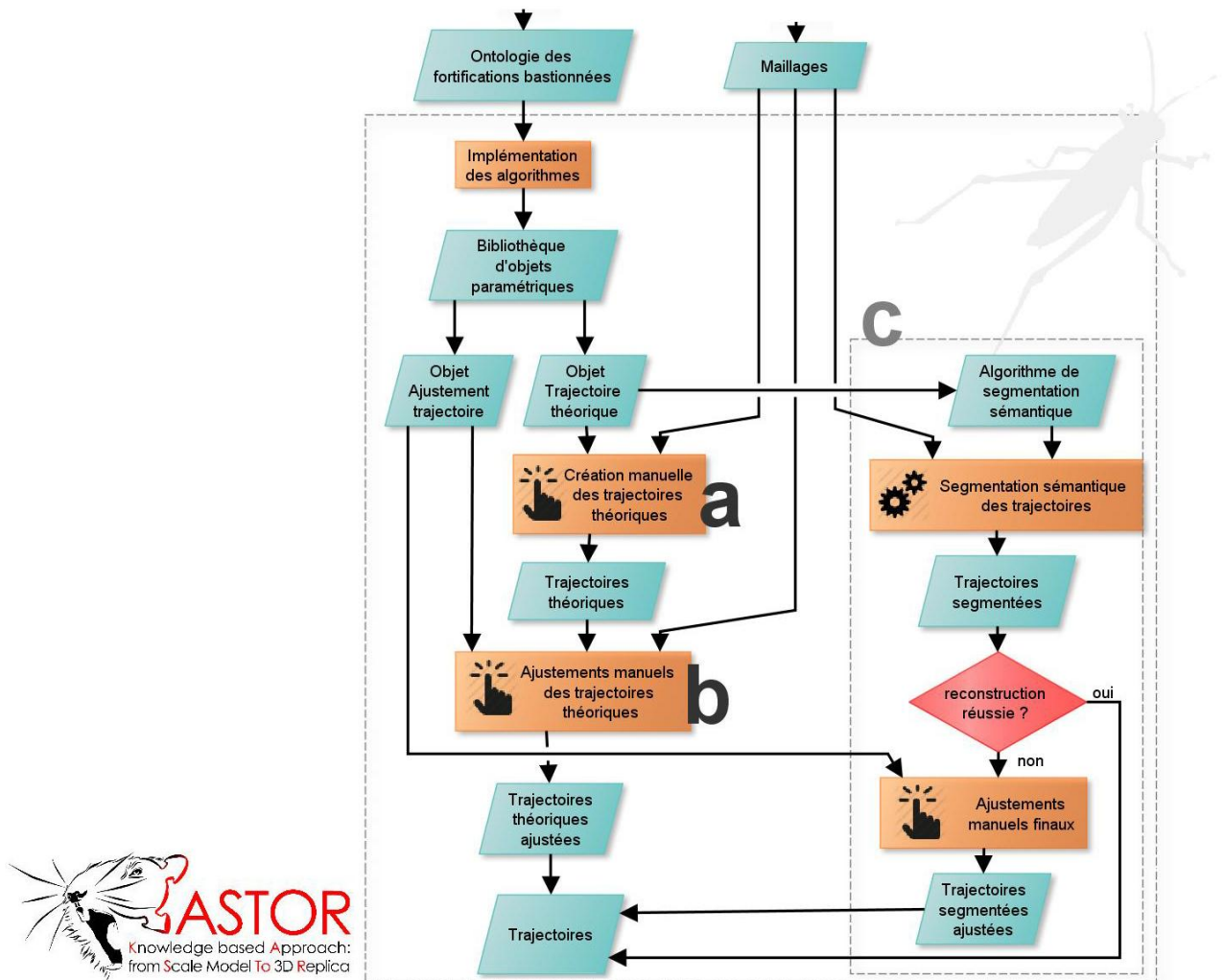


Figure 81. Principales étapes de l'approche KASToR. Dans un premier temps manuelle (a et b), la reconstruction des trajectoires est ensuite assurée automatiquement par le biais d'opérations de segmentation sémantique (c).



Après avoir présenté les spécificités de la modélisation paramétrique par programmation visuelle sur Grasshopper dans une première partie (V.1), nous présentons notre bibliothèque de composants de fortification bastionnée. Ainsi, l'implémentation et les expérimentations menées selon l'approche KASToR sont détaillées dans les trois parties suivantes :

1. La génération de trajectoires théoriques (partie V.2) ;
2. L'ajustement manuel de ces ouvrages précédents à des données extérieures (partie V.3) ;
3. L'extraction automatique des données nécessaires à la reconstruction des ouvrages de fortification (partie V.4).

Enfin, l'évaluation et la présentation des résultats de l'extraction automatique des trajectoires des ouvrages de fortification sont présentées dans la partie V.5. La partie suivante (V.6), est consacrée à l'étape de reconstruction des trajectoires et en particulier aux ajustements manuels finaux des trajectoires. La partie V.7 est enfin l'occasion d'explorer plusieurs pistes de développement pour le prototype.

V.1. Prototypage sur Grasshopper

Grasshopper et Rhino ont été choisis pour l'implémentation des algorithmes de création et d'ajustement de trajectoires, ainsi que pour les processus de segmentation et d'ajustement automatique des trajectoires. Bien que certaines opérations restent impossibles (itération et récursivité en particulier) ou complexes à effectuer (manipulation de listes par exemple), Grasshopper a été privilégié pour sa capacité à concevoir et manipuler facilement des objets tridimensionnels paramétriques dont on peut visualiser immédiatement les modifications. De plus, la programmation visuelle – contrairement à la programmation textuelle – me permet de développer ce prototype directement sans avoir à solliciter les connaissances de programmeurs. Dans le cas présent, ma formation d'architecte m'a permis à la fois de modéliser les connaissances de fortification bastionnée et d'implémenter sur Grasshopper les algorithmes de reconstructions qui en sont issus et présentés dans la suite de cette étude.

V.1.a. Manipulation et génération de données

Grasshopper dispose d'une bibliothèque d'objets prédéfinis qui sont classés dans neuf catégories différentes : la première catégorie regroupant les paramètres et les moyens de les manipuler ou de les afficher et les huit autres catégories abritant les composants. Ces derniers encapsulent des algorithmes permettant d'effectuer de nombreuses opérations mathématiques et en particulier géométriques. La plupart des composants sont formés de cinq parties (Figure 82) : les noeuds d'entrée (a) qui permettent la connexion à d'autres objets, les options d'entrée (b) qui permettent de modifier la structure des données entrantes, le corps (c), les options de sortie (d) et les noeuds de sortie et leurs options (e).

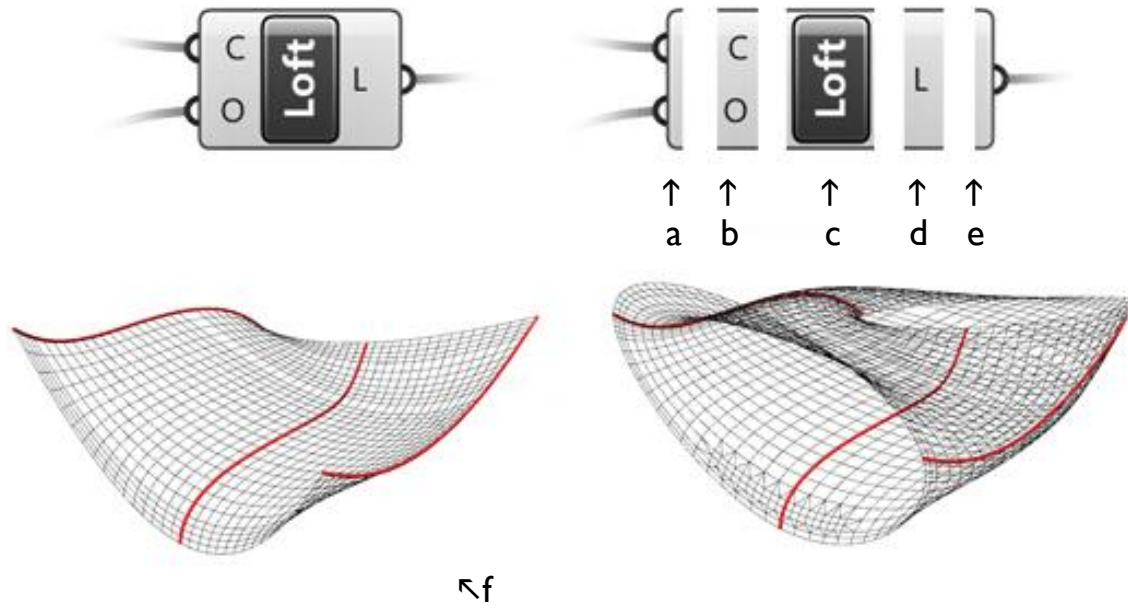


Figure 82. Le composant 'Loft' est une opération de création de surface à partir de courbes. Des options (entrée O) permettent entre autres d'ouvrir (f) ou de fermer (g) la surface créée.

En connectant différents objets, il est alors possible d'implémenter de nouveaux algorithmes et de générer de nouvelles données dont la représentation explicite est assurée par le programme hôte : Rhino. La programmation visuelle de Grasshopper (Figure 83) est réalisée selon une représentation très proche des organigrammes de programmation (Figure 84).

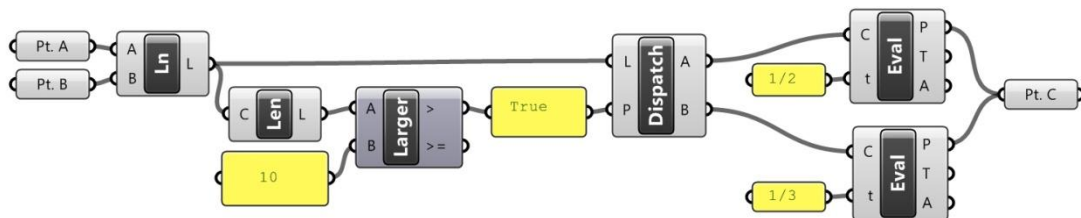


Figure 83. Algorithme Grasshopper permettant la création d'un point C dont la position, au milieu ou au tiers d'un segment [AB], est définie par la longueur de ce dernier.

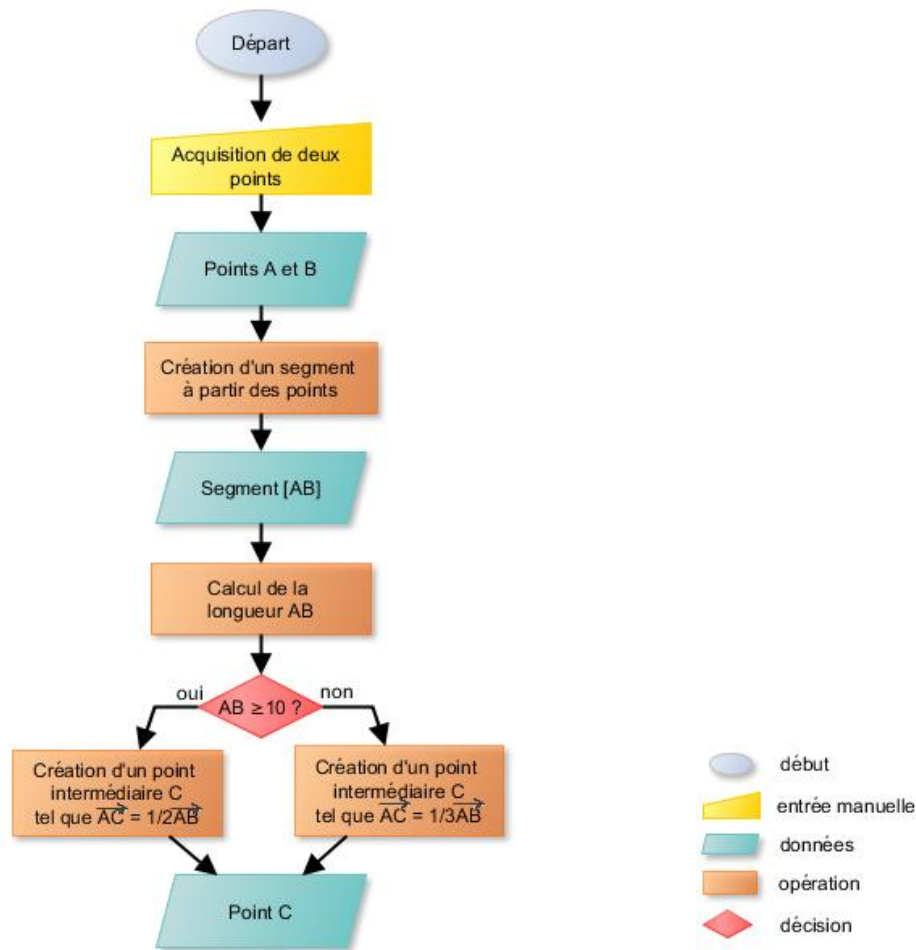


Figure 84. Organigramme de programmation décrivant l'algorithme présenté dans la Figure 83.

V.1.b. Structure des données

Dans Grasshopper, les données sont placées dans des listes. Les différentes listes de données sont organisées dans des arbres de données où chaque branche et donnée est identifiée par un chemin ($\{0\}$, $\{1\}$ et $\{0;x;y;\dots\}$ pour les ramifications) et un numéro d'index (Figure 85). Les arbres sont davantage comparables à des dictionnaires qu'à des tableaux à plusieurs dimensions. Un dictionnaire est caractérisé par des entrées auxquelles sont associées une ou plusieurs définitions. Dans les arbres de Grasshopper, les entrées du dictionnaire sont les chemins d'accès aux données (*'path'*) tandis que les définitions sont les données classées selon leur numéro d'index (*'item index'*). Malgré l'existence de nombreux composants, la manipulation de ces structures arborescentes et l'accès aux données constituent un enjeu majeur pour un programmeur même expérimenté dès qu'il s'agit de trouver des alternatives aux limites d'itérations (Janssen, Chen, 2011).

Pour améliorer la manipulation, l'affichage et la compréhension des algorithmes implémentés sur Grasshopper, il est possible d'encapsuler un ensemble de composants pour créer un nouveau composant (Figure 86). Ces composants, ou *clusters* dans le jargon de Grasshopper, peuvent ensuite être placés dans de nouvelles catégories de composants, des *user objects*, aux côtés de celles qui sont existantes. Le premier avantage des *clusters* est qu'ils permettent de réduire le nombre de composants et de paramètres à l'écran en

regroupant des séquences d'opérations. Placés dans une nouvelle catégorie, ces composants créés par l'utilisateur peuvent être réutilisés facilement au sein du projet, mais aussi dans d'autres projets, ou par d'autres utilisateurs. La création d'un *cluster* répond surtout à la nécessité de structurer une séquence de composants correspondants à une opération particulière du fait de sa fréquence ou de sa pertinence dans le projet (opération de création de trajectoire de front, par exemple).

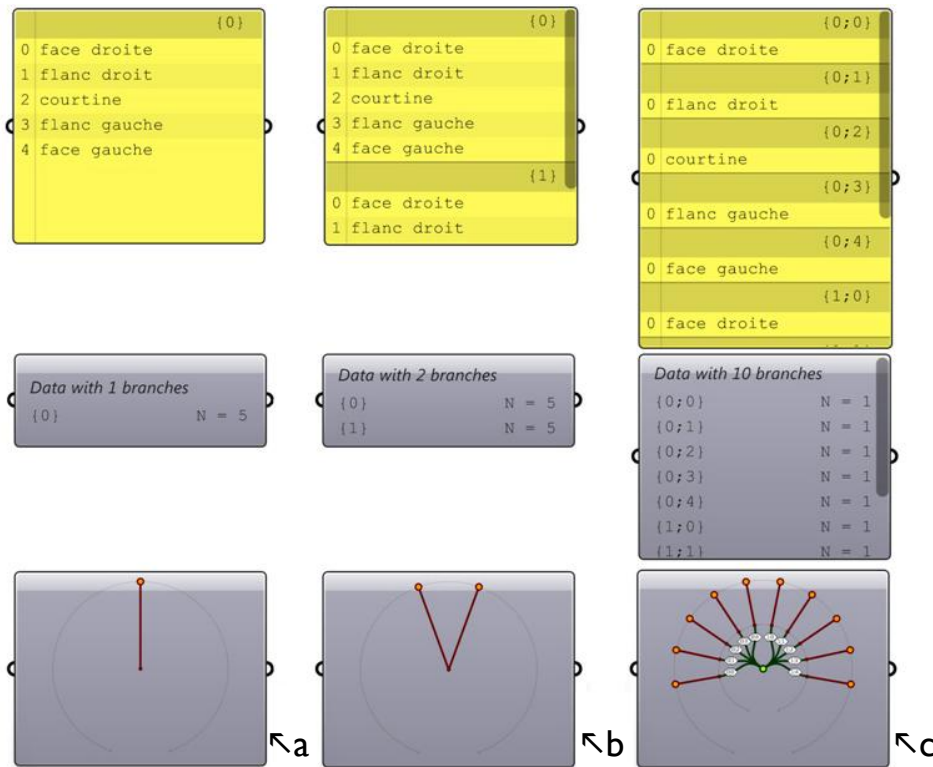


Figure 85. De haut en bas : composants de visualisation de Grasshopper permettant différentes représentations des listes de données. De gauche à droite :

- a) représentation d'un arbre à une branche de chemin d'accès {0} et de ses 5 items d'indice 0, 1, 2, 3, 4 et 4 ;
- b) représentation d'un arbre à deux branches de chemin d'accès {0} et {1} et de leurs 5 items respectifs ;
- c) représentation d'un arbre à deux branches initiales pourvues de cinq ramifications chacune comportant un item.

La création de composants personnalisés à partir de composants basiques de Grasshopper est à mettre en parallèle avec le concept de modèle de conception ou encore patron de conception ('*design pattern*') de Robert Woodbury (2010), des solutions génériques à des problèmes définis et circonscrits. Les patrons de conception définis par Woodbury et implémentés sur Grasshopper⁸⁶ sont « réutilisables, d'un niveau d'abstraction satisfaisant les exigences d'une pratique optimale ».

⁸⁶ <http://www.andrew.cmu.edu/org/tsunghsw-design/>

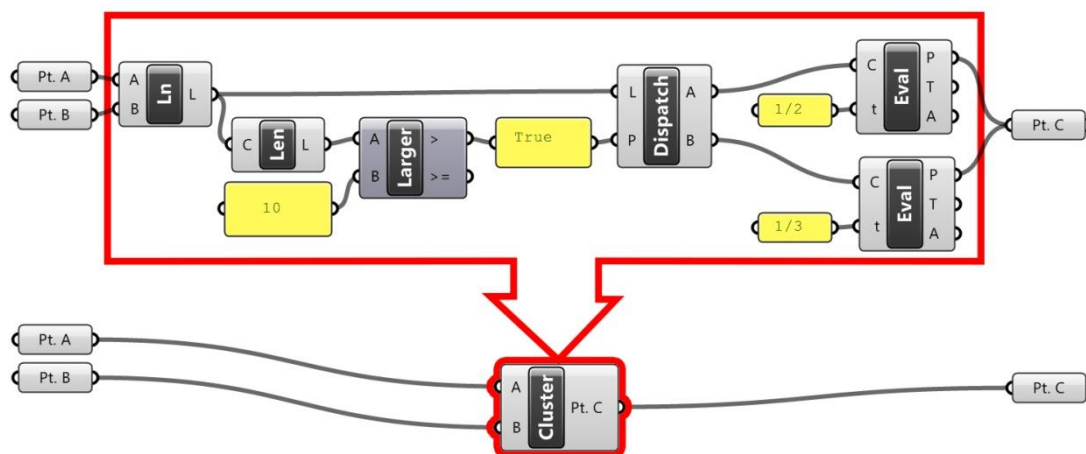


Figure 86. Création d'un nouveau composant Grasshopper ('cluster') qui permet, à partir de deux points, de créer un point dont la position, entre A et B, dépend de la distance de ces points.

V.2. Implémentation et expérimentations des trajectoires théoriques des ouvrages de fortification bastionnée

De nombreux efforts ont en effet été portés sur l'optimisation des différents algorithmes implémentés sur Grasshopper. Les différentes trajectoires qui enrichissent la bibliothèque d'objets de Grasshopper ont été réalisées sous la forme de composants utilisateurs ('clusters') afin d'améliorer la manipulation, l'affichage et la compréhension des algorithmes implémentés.

Rappelons ensuite que le dessin des différents fronts formant l'enceinte repose sur le tracé en plan d'une trajectoire sur laquelle est balayé un profil. La plupart des autres ouvrages de fortification sont conçus de manière similaire, par la mise en relation d'une trajectoire et d'un profil. La bibliothèque d'objets est donc composée des trajectoires des ouvrages les plus communément rencontrés dans la fortification bastionnée. Les expérimentations de ces composants, et en particulier l'ajustement des trajectoires, prennent place sur une représentation planaire des données relevées⁸⁷ ou sur des cartes contemporaines aux fortifications présentes sur les plans-reliefs.

La première partie V.2.a décrit l'implémentation des trajectoires des différents ouvrages selon les règles de constructions théoriques énoncées dans les traités de fortification. La partie V.3 complète la bibliothèque par l'implémentation de composants destinés à l'ajustement des trajectoires théoriques précédemment créées. On dispose ainsi de trajectoires théoriques paramétriques (Figure 87, a) que l'on peut déjà ajuster manuellement à des données relevées (Figure 87, b). L'automatisation de ce processus, étape indispensable pour optimiser les temps et la précision du processus (Figure 87, c), nécessite d'effectuer une segmentation sémantique des données (V.4). Les trajectoires théoriques implémentées dans la partie V.2.a sont alors utilisées pour permettre l'extraction des différentes lignes (face, flanc et courtine) composant les trajectoires des ouvrages. Une fois ces lignes extraites, il est possible de reconstruire les trajectoires qui peu-

⁸⁷ La création d'une représentation planaire du relevé tridimensionnelle sous la forme de courbes de niveau est développée lors de la présentation de la première opération menée pour la segmentation de données brute, au chapitre V.4.b.a : Opération A. Création de côtés extérieurs approximatifs, page 167

vent encore faire l'objet d'ajustements manuels, par le biais des composants présentés en partie V.3. La rétroconception des trajectoires des ouvrages de la place et des ouvrages extérieurs, tout du moins du front, de la demi-lune et de la tenaille, est ainsi achevée.

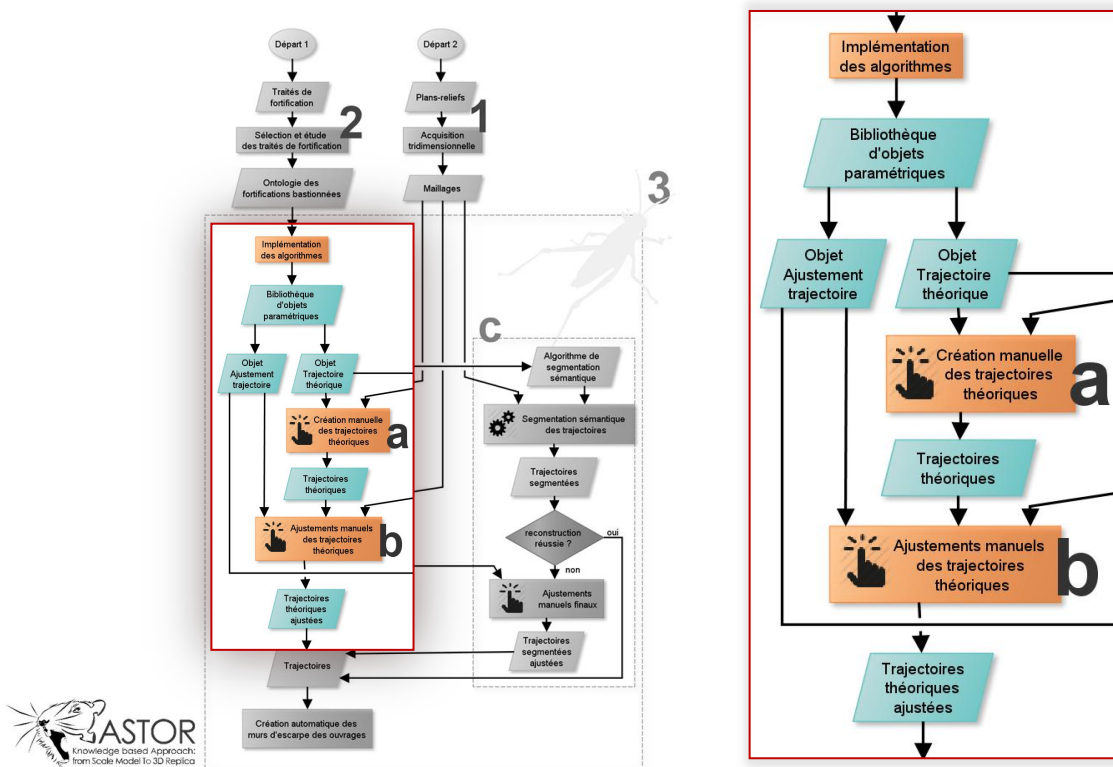


Figure 87. Dans les premiers temps de l'approche KASToR, les trajectoires théoriques (a) ainsi que leurs paramètres d'ajustement (b) sont implémentés et testés pour valider ces algorithmes qui seront utilisés lors du processus de segmentation pour l'automatisation de la reconstruction (c).

V.2.a. La génération de trajectoires théoriques

La première trajectoire implémentée est celle de l'enceinte (V.2.b). Elle permet d'obtenir un tracé qui donne l'orientation de la construction des ouvrages, depuis la place vers la campagne. Les trajectoires du chemin couvert (V.2.c), de la tenaille (V.2.d), de la demi-lune (V.2.e) et de l'ouvrage à corne (0) ne peuvent être construites que si la trajectoire d'un précédent ouvrage est déjà réalisée⁸⁸.

V.2.b. Front bastionné

Les fronts bastionnés de l'enceinte tiennent un rôle tout particulier, puisque c'est de leur dessin que dépend la création des autres trajectoires d'ouvrages. Néanmoins, certains ouvrages ne reposent pas sur des constructions géométriques antérieures à l'instar de plusieurs ouvrages fortifiés de Metz, Huningue ou de Strasbourg (Figure 88). Beaucoup sont similaires au tracé des fronts de l'enceinte par la présence d'un ou de plusieurs fronts bastionnés à la tête de ces ouvrages fortifiés. Les trajectoires de ces ouvrages avancés – les ouvrages extérieurs construits au-delà du chemin couvert – sont ainsi construites de la même manière que les fronts de l'enceinte : par le dessin d'un ou de plusieurs fronts bastionnés indépendamment de tout tracé antérieur.

⁸⁸ cf. Partie B, chapitre IV.4.c.a, page 123

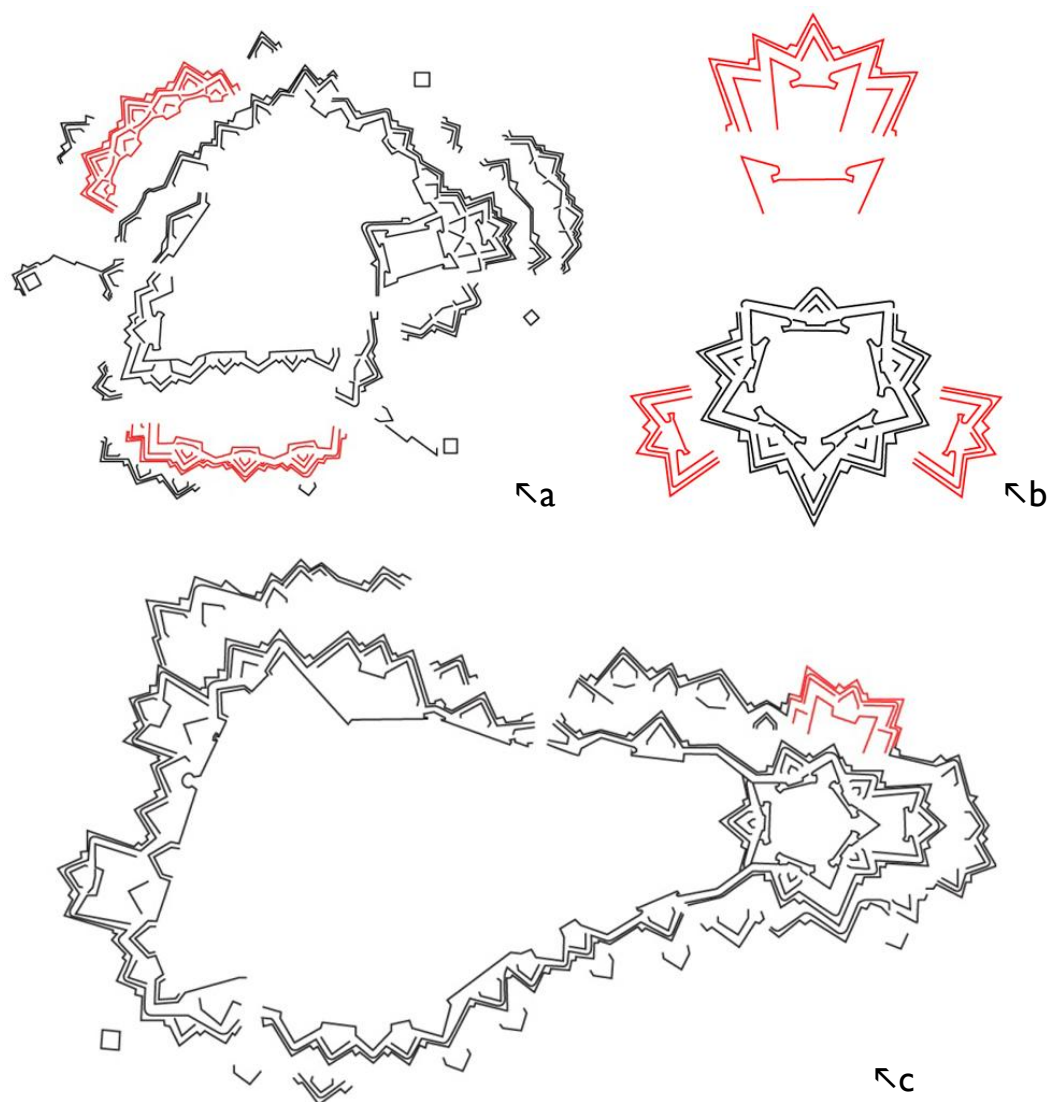


Figure 88. La double couronne de Moselle, la double couronne de Belle-Croix à Metz (a), des ouvrages avancés à Huningue (b) et un ouvrage à corne à Strasbourg (c) peuvent être construit à l'aide du composant trajectoire de front.

Pour l'implémentation de ce composant permettant le dessin de la trajectoire théorique du front, nous utilisons la première méthode de Vauban, telle qu'elle est rapportée par le Blond ou d'autres (Figure 89). Rappelons que ce choix est fondé sur l'étude des traités de fortification⁸⁹ et qu'il est expliqué notamment par l'intense activité de l'ingénieur.

⁸⁹ cf. Partie B, chapitre IV.2.c, page 111

PROBLÈME I.

70. Tracer le trait principal, ou la ligne magistrale de l'enceinte d'une place forte.

Soit décrit un cercle d'un rayon quelconque AB , dans lequel on inscrira tel polygone que l'on voudra, par exemple, un exagone, en portant le rayon AB six fois sur la circonférence, (comme on l'a vu dans la Géométrie,) savoir de B en C , de C en R , &c.; & en tirant ensuite les lignes BC , CR , &c.

Pl. III.

Sur le milieu de BC , côté du polygone, on élèvera une perpendiculaire ID vers le centre, & laquelle on donnera :

La huitième partie du côté BC , si le polygone est un carré.

La septième partie de BC , si le polygone est un pentagone.

Et enfin, la sixième partie de BC , si c'est un exagone, comme dans cet exemple, ou un autre polygone d'un plus grand nombre de côtés.

Par les extrémités B & C du côté BC du polygone, & par le point D , on tirera les lignes de défense BD , CD , prolongées indéfiniment vers F & vers E .

On prendra deux septièmes du côté BC , & on les portera sur les lignes de défense de B en H , & de C en G , pour la longueur des faces des bastions.

On posera une pointe du compas au point G , & on l'ouvrira jusqu'à ce que l'autre pointe tombe sur le point H ; du point G pris pour centre, & de l'intervalle GH , on décrira un arc HE , qui coupera la ligne de défense en E . Le compas restant dans la même ouverture, on prendra le point H pour centre, & l'on décrira l'arc GF , qui coupera la ligne de défense BF en F .

Les lignes de défense étant déterminées en E & en F , & les faces en H & G , il ne reste plus pour avoir le principal trait qu'à joindre ces quatre points par trois lignes droites; savoir, les extrémités des lignes de défense par la ligne EF , qui sera la courtine, & les extrémités des faces & de la courtine par les lignes HE , GF , qui seront les flancs des demi-bastions BHE , CGF . Si l'on fait les mêmes opérations sur tous les autres côtés du

polygone, ou aura le principal trait, ou la ligne magistrale tracée.

M. de Vauban, dont nous suivons le système dans ce problème, se sert pour l'*Echelle* de son plan, du côté BC du polygone, qu'il suppose toujours de 180 toises.

Pour diviser cette échelle, il faut tirer au crayon, au bas du papier, une ligne indéfinie, sur laquelle on prendra ab égale au côté BC , & cette ligne ab sera supposée de 180 toises.

On la divisera en deux également en c ; l'on écrira 90 sous ce point, & 180 sous le point b : on divisera la moitié ac en trois parties égales ad , de , ec , dont chacune vaudra 30 toises; l'on mettra 30 sous d , & 60 sous e . L'on divisera la partie ad en trois parties égales, dont chacune vaudra 10 toises. L'on divisera la première af en deux parties égales, dont chacune vaudra 5 toises; & enfin la première de ces deux parties af en 5 parties égales, dont chacune vaudra une toise, & l'on aura l'échelle ab divisée dans toutes les parties nécessaires pour la construction du plan.

Si l'on veut se servir de cette échelle pour tracer le plan :

On donnera, dans le carré, 22 toises à la perpendiculaire ID , parce que 22 est la huitième partie de 180 toises, valeur du côté BC ; 25 toises, si le polygone que l'on fortifie est un pentagone, ce nombre étant la septième partie de BC ; & 30 toises si c'est un exagone, ou un polygone d'un plus grand nombre de côtés, cette quantité étant la sixième partie du même côté BC .

A l'égard des faces BH & CG , on leur donnera 50 toises dans tous les polygones, qui sont à-peu-près les deux septièmes de 180.

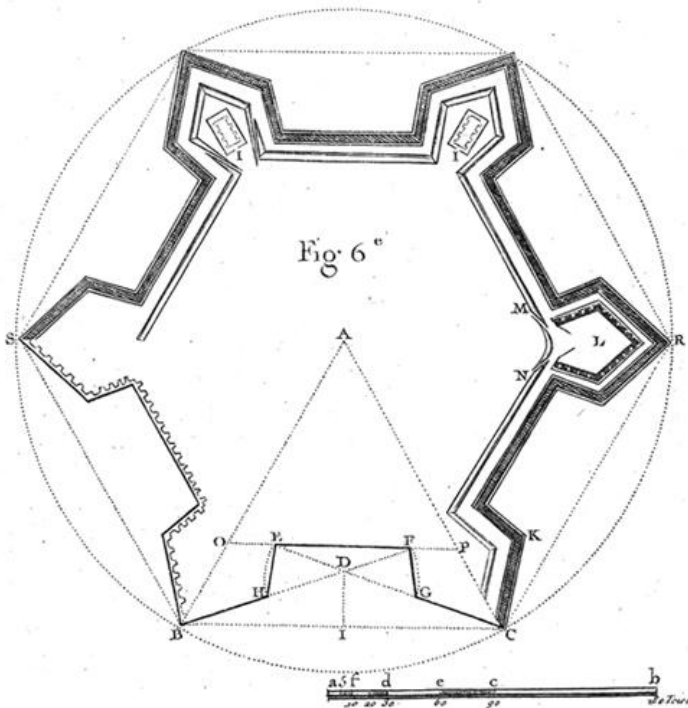


Figure 89. Règle de construction de l'enceinte de Vauban selon Le Blond. D'après: Le Blond, 1786

L'algorithme 1, présenté ci-après, présente les différentes opérations nécessaires au tracé de la trajectoire du front de Vauban. Il s'agit tout d'abord d'identifier le milieu C du côté extérieur AB du front AEHBG à créer (Figure 90). De ce point C, un segment CD perpendiculaire à AB est tracé. Sa longueur varie en fonction du nombre de côtés du polygone formant l'enceinte, c'est-à-dire du nombre de fronts qui sont mitoyens. Une enceinte à quatre côtés a une perpendiculaire dont la longueur représente le huitième de la longueur du côté extérieur AB, tandis qu'une enceinte à cinq côtés présente un rapport de 1/7 et de 1/6 pour une enceinte à six côtés et plus. Le point D donne alors la direction des vecteurs supportant les faces AE et BF. Leur longueur est de 2/7 de celle du côté extérieur AB, quel que soit le nombre de côtés de l'enceinte. Enfin, la longueur AF (et BE) correspond à celle de la ligne de défense AH passant par E (et BG passant par F). Les points G et H ainsi créés correspondent aux extrémités de la courtine. Les points E, G et F, H aux extrémités des flancs.

Algorithme 1 : Tracer la trajectoire d'un front bastionné AEGHFB selon la première méthode de Vauban

Début

Variables en entrée :

- A et B \leftarrow 2 points
- n \leftarrow nombre de front

Instructions :

- . Calcul C tel que C milieu de [AB]
- . Calcul [CD] tel que [CD] \perp [AB]

Selon n

- 4 : CD \leftarrow AB/8
- 5 : CD \leftarrow AB/7
- \geq 6 : CD \leftarrow AB/6

FinSelon

- . Calcul E tel que
E \in [AD] et
AE = 2/7 x AB
- . Calcul F tel que
F \in [BD] et
BF = 2/7 x AB
- . Calcul H tel que
H \in [AD] et
AH = AF
- . Calcul G tel que
G \in [BD] et
BG = BE

Variables en sortie :

- La trajectoire du front bastionné \leftarrow AEGHFB

Fin

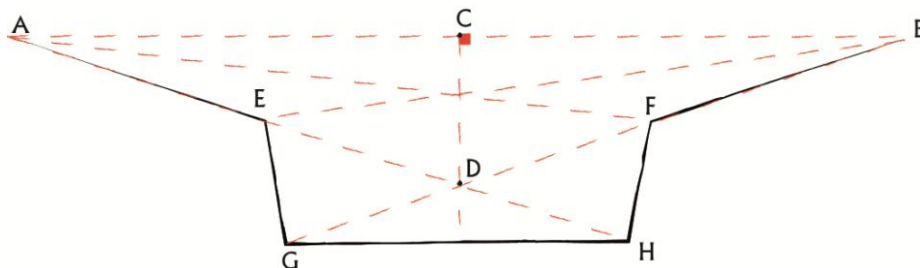


Figure 90 Tracé du front bastionné selon la première méthode de Vauban telle qu'elle est rapportée par Guillaume le Blond.
D'après: Le Blond, 1786

L'implémentation sur Grasshopper (Figure 91) nécessite le placement des deux points formant les extrémités du front. Il faut ensuite les convertir en paramètre dans Grasshopper par la commande 'Set Multiple Points' accessible depuis le composant 'Point'. Ces points font donc office de données initiales, c'est à partir de ce couple de points que l'on va pouvoir tracer la trajectoire des fronts et celle des autres ouvrages. À partir des points A et B, il est possible de déterminer le milieu du segment [AB] tout en y plaçant un nouveau système de coordonnées ou 'Frame' (Woodbury, 2010) dont l'axe z (axe vertical) est confondu avec ce segment. Le composant permettant la création de ce repère est le seul capable de créer une droite perpendiculaire à une autre dans Grasshopper. La direction du vecteur Y permet de créer la droite orthogonale à AB tandis que la position du point D est donnée par les relations précédemment mentionnées. Le sens du vecteur Y étant variable, il est nécessaire de définir un paramètre permettant de contrôler son sens sans quoi la perpendiculaire CD pourrait être du mauvais côté du futur front.

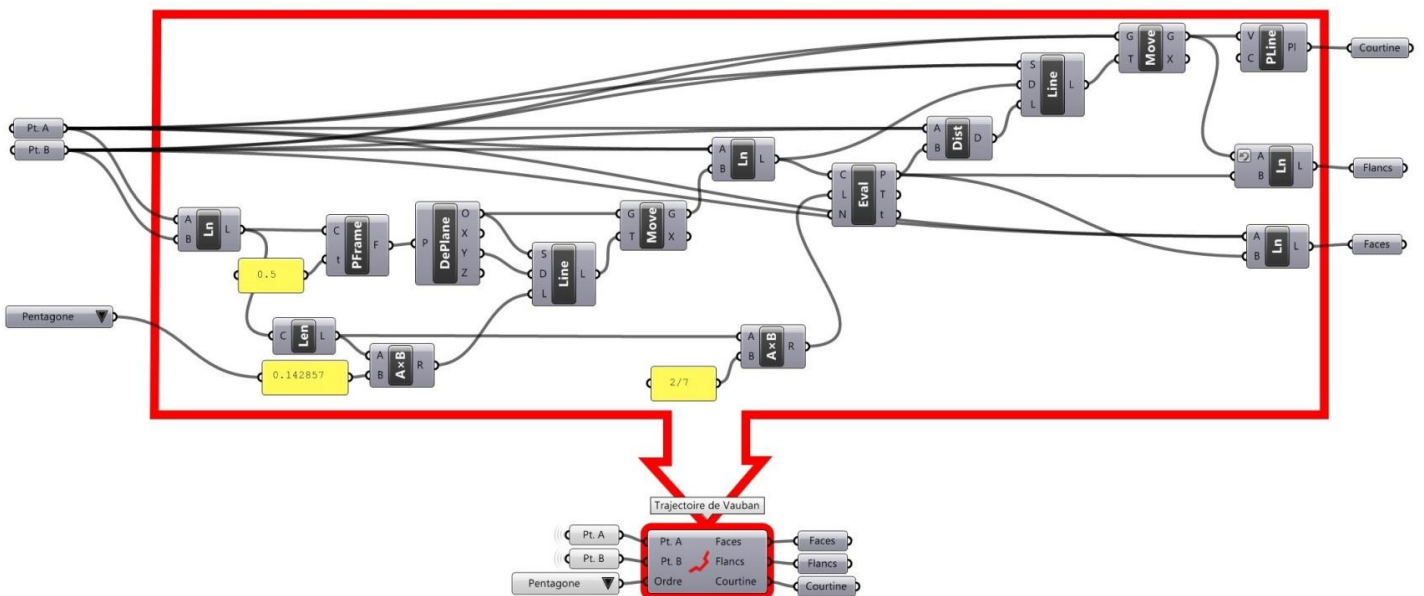


Figure 91. Programme de création du tracé de la trajectoire d'un front bastionné selon la première méthode de Vauban et sa réduction sous la forme d'un 'cluster'

Des trajectoires de fronts dont les règles de constructions ont été établies par d'autres ingénieurs ont également été implémentées (Figure 92). On remarque une différence au niveau du placement des points initiaux. Alors que Vauban, Errard et Pagan utilisent les sommets⁹⁰ des bastions pour construire leur front, d'autres ingénieurs comme De Ville, Mallet ou Cormontaigne dessinent le front à partir des sommets du polygone intérieur : une ligne polygonale confondue avec le tracé des courtines (Figure 148)

Il est à noter que pour les dessins les trajectoires d'Errard, De Ville, Mallet et Cormontaigne, les règles de construction présentes dans les traités ont recours au centre du polygone régulier intérieur ou extérieur. Il est donc nécessaire d'adapter ces règles pour pouvoir reconstruire des fronts n'appartenant pas à des polygones réguliers (par exemple : le front est délimité par un unique segment ou les fronts sont dé-

⁹⁰ Ces sommets sont également appelés capitales dans le jargon de la fortification bastionnée

limités par une ligne polygonale ouverte ou fermée). Dans le cas d'un unique segment, il est impossible de déduire cette information, le choix est laissé à l'utilisateur. En revanche, lorsque le segment appartient à une ligne polygonale ouverte ou fermée, on peut déduire un point qui peut se substituer au centre du polygone.

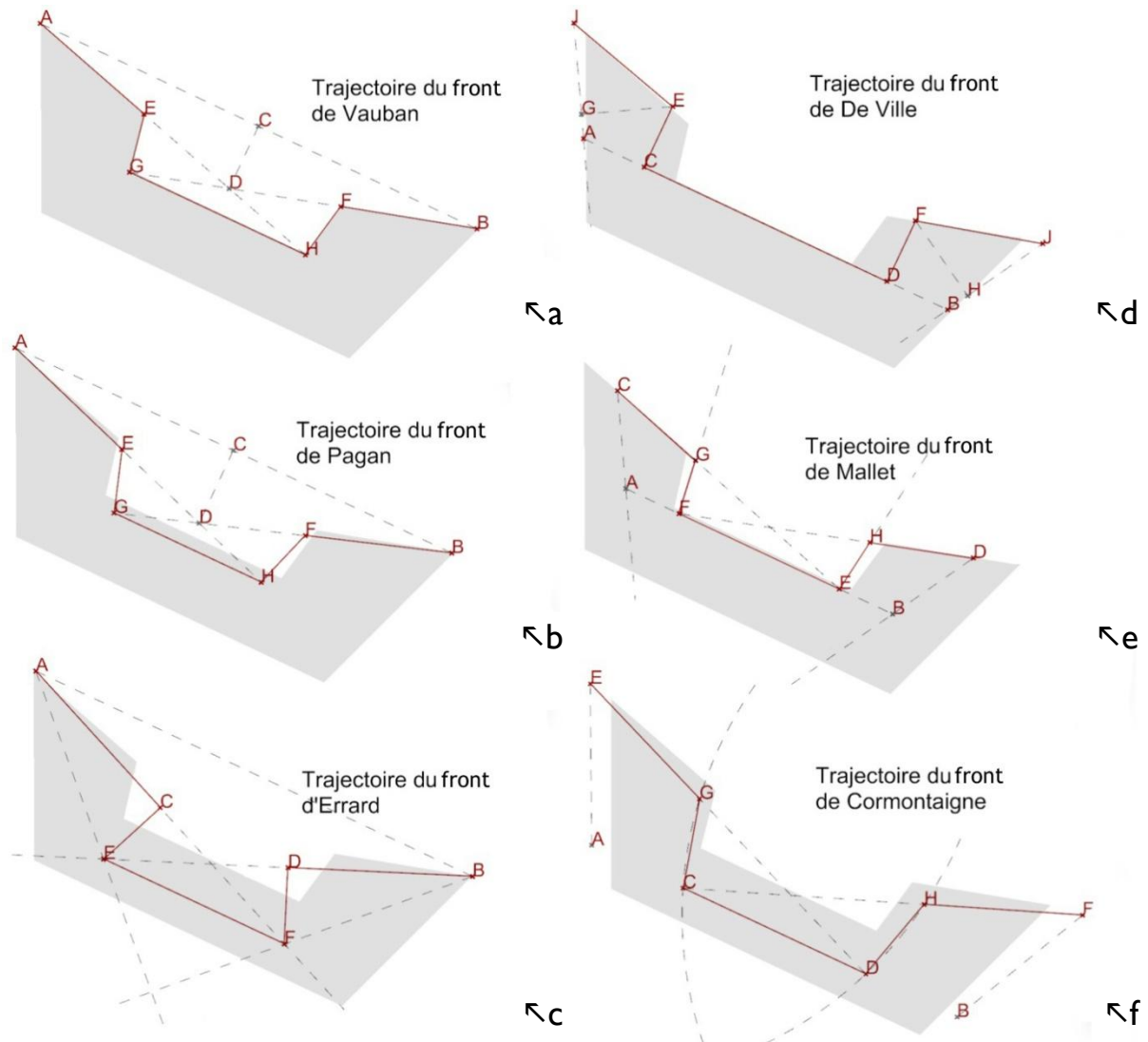


Figure 92. Trajectoires théoriques de fronts implémentées dans Grasshopper. Les surfaces grisées permettent de comparer le tracé de Vauban (a) avec celles de Pagan (b), Errard (c), de Ville (d), Mallet (e) et Cormontaigne (f). Dans chaque cas, seuls les points A et B ont été placés manuellement.

Pour ce faire, l'angle formé entre chaque segment ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, etc. dans la Figure 93, a) de la ligne polygonale doit être assimilé à l'angle interne d'un polygone. La valeur de cet angle (β dans la Figure 93, b) est unique pour chaque type de polygone régulier : 60° pour le triangle, 90° pour le carré, 108° pour le pentagone, etc.⁹¹. Après avoir comparé l'angle moyen $\bar{\alpha}$ de la ligne polygonale aux différentes valeurs β possibles, on peut déterminer un ordre n pour la ligne polygonale. L'ordre nous permet enfin de calculer la

⁹¹ La valeur de l'angle interne d'un polygone régulier par rapport à son nombre de côté n est donnée par la mule $\alpha = (n - 2) \times \pi / n$

longueur de l'apothème⁹² du polygone régulier dont l'angle interne β est le plus proche de la valeur $\bar{\alpha}$ de ligne polygonale. L'extrémité de l'apothème est le sommet du triangle isocèle dont la base est constituée du segment de la ligne polygonale par l'équation 4.

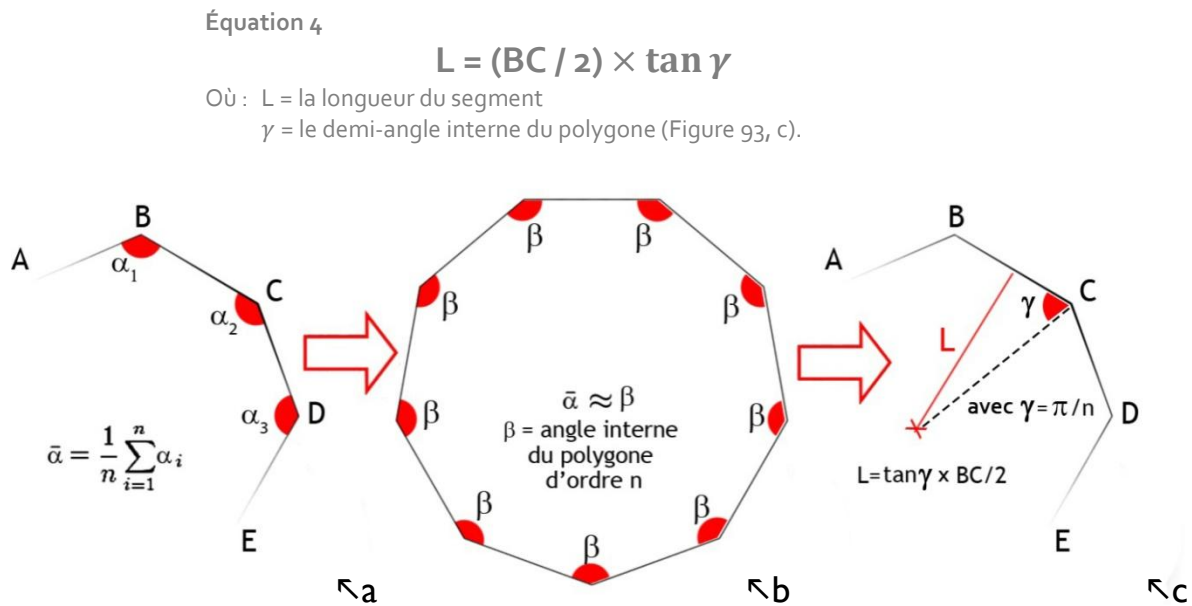


Figure 93. La valeur moyenne des angles de la ligne polygonale (a) permet de déterminer l'ordre du polygone parent (b) et ainsi de calculer la longueur de l'apothème de chaque segment de la ligne polygonale (c).

Connaissant l'ordre du polygone, il est ensuite possible de définir un algorithme pour le tracé des trajectoires des fronts selon la méthode de Cormontaigne (Figure 94), de De Ville, Pagan, Mallet et Errard⁹³.

L'algorithme 2 présente les opérations nécessaires au tracé de la trajectoire du front bastionné selon Cormontaigne. Le placement des points C et D est réalisé en fonction de la longueur du côté initial et permet de tracer la courtine du front bastionné. Il est nécessaire ensuite de recourir au centre du polygone régulier pour la création du reste du tracé. En l'absence de polygone régulier, nous devons recourir à la méthode présentée précédemment. Le placement du point K au centre du côté initial permet le dessin d'une perpendiculaire dont la longueur est donnée par la formule (1). L'extrémité de cette perpendiculaire est le point O, duquel sont tracées deux droites [OA) et [OB). Les capitales des bastions E et F, c'est-à-dire les extrémités des faces du front, se trouvent sur ces droites à une distance calculée à partir de la longueur du côté initial. Enfin, les points G et H, partagés par les faces et les flancs, sont les points d'intersection des cercles de centre F et A et de rayons FC et ED et des segments [ED] et [FC] respectivement.

⁹² L'apothème est le segment perpendiculaire à un côté du polygone et qui rejoint le centre de l'hexagone

⁹³ cf. Construction de la trajectoire du front selon la méthode de De Ville (Figure 167, page 252), Pagan (Figure 168, page 253), Manesson Mallet (Figure 169, page 254) et Errard (Figure 170, page 255).

Algorithme 2 : Tracer la trajectoire EGCDHF d'un front bastionné selon la méthode de Cormontaigne :

Début

Variables d'entrée :

A et B \leftarrow 2 points

n \leftarrow nombre de fronts

Instructions :

. Calcul de C tel que C \in [AB]

. Calcul de D tel que D \in [AB]

Selon AB

120 : AC = AB/5

BD = AB/5

130 : AC = AB/5

BD = AB/5

140 : AC = AB/4

BD = AB/4

150 : AC = AB/4

BD = AB/4

FinSelon

. Calcul de K milieu de [AB]

. Calcul de O tel que

[KO] \perp [AB] et

$$KO = \left(\frac{AB}{2}\right) \times \tan\left(\frac{\pi}{n}\right)$$

. Calcul de E tel que E \in [OA)

. Calcul de F tel que F \in [OB)

Selon AB

120 : AE = AB/3

BF = AB/3

130 : AE = AB/3

BF = AB/3

140 : AE = AB \times 2/3

BF = AB \times 2/3

150 : AE = AB \times 2/3

BF = AB \times 2/3

FinSelon

. Calcul du cercle \mathcal{C}_1

de centre F et

de rayon FC

. G \leftarrow l'intersection de [ED] et de \mathcal{C}_1

. Calcul du cercle \mathcal{C}_2

de centre E

de rayon ED

. H \leftarrow l'intersection de [FC] et de \mathcal{C}_2

Variable de sortie :

La trajectoire du front bastionné \leftarrow EGCDHF

Fin

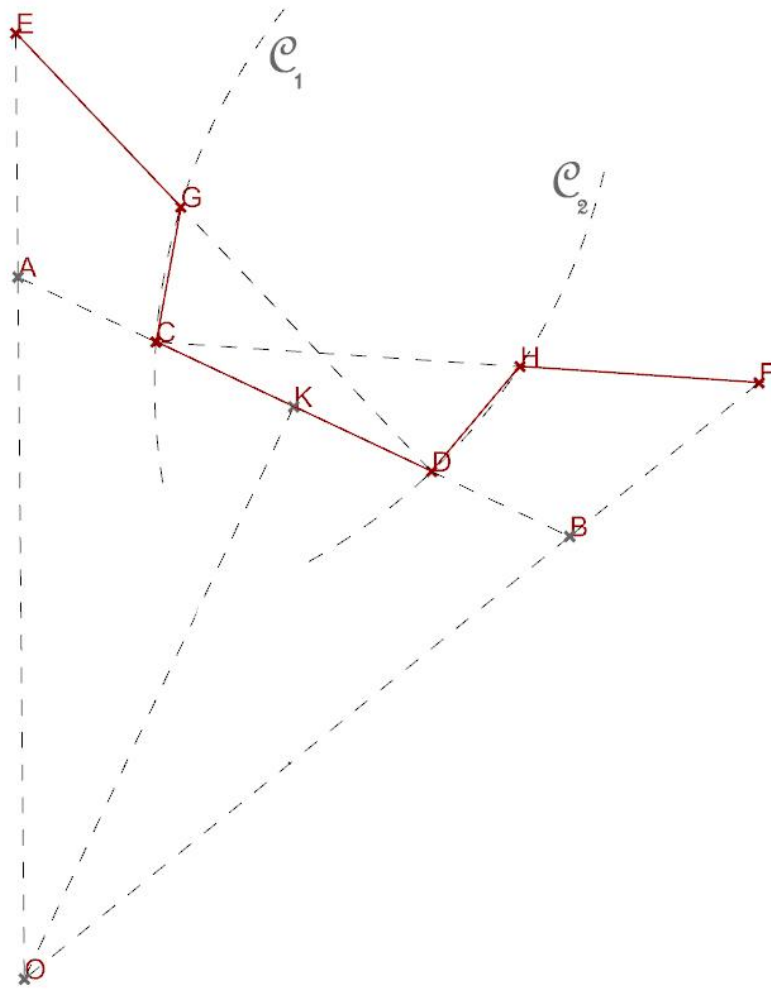


Figure 94. Construction de la trajectoire du front selon la méthode de Cormontaigne.
D'après : Cormontaigne, 1741, voir en annexe les règles de construction originales

Les orillons sont des prolongements des faces des fronts au-delà de l'alignement d'un flanc ou d'une autre face, dont la fonction est de protéger les pièces d'artillerie de ce flanc ou de cette face (Figure 99). Deux méthodes ont été étudiées, celle de Vauban, telle que rapportée par Le Blond et celle de Cormontaigne. Présentant une grande similarité, elle se distingue principalement dans le placement de l'orillon sur la face.

L'algorithme 3 présenté ci-après reprend uniquement la méthode de Vauban pour le tracé des trajectoires des orillons. Sur les flancs [BC] et [ED] du front bastionné ABCDEF, les points G, I et H, J sont placés selon les valeurs précisées dans l'algorithme. Il s'agit ensuite de définir les cercles supports des arcs formant les orillons \widehat{BG} et \widehat{EH} les flancs concaves \widehat{MO} et \widehat{NP} . Ainsi, K et L, centres des arcs \widehat{BG} et \widehat{EH} , se situent à l'intersection des perpendiculaires issues pour K, de I et de B, et pour L, de J et de N. Les revers des orillons [GM] et [HN] sont obtenus par le prolongement de [FG] et de [AH] à une distance de 5 toises tandis que les seconds flancs [CO] et [DP] sont obtenus par le prolongement de [FC] et de [AD] à une distance de 5 toises. Le centre S et T des flancs concaves se situent sur les bissecteurs de [GC] et [HD] et les arcs \widehat{MO} et \widehat{NP} ont pour rayons respectifs $SM=MO$ et $TN=NP$.

Algorithme 3 : Tracer la trajectoire des orillons BGMOG et EHNPD d'un front bastionné selon la méthode de Vauban telle qu'elle est rapportée par Guillaume Le Blond :

Début

Variables d'entrée :

ABCDEF \leftarrow la trajectoire du front bastionné

Instructions :

- . Calcul de G tel que
 - G \in [BC] et
 - BG = BC/3
- . Calcul de H tel que
 - H \in [ED] et
 - EH = ED/3
- . Calcul de I tel que
 - I \in [BG] et
 - BI = BG/2
- . Calcul de J tel que
 - J \in [EH] et
 - EJ = EH/2
- . Calcul de K tel que
 - [IK] \perp [BC] et
 - [BK] \perp [AB]
- . Calcul de L tel que
 - [JL] \perp [ED]
 - [EL] \perp [EF]
- . Tracer \widehat{BG} tel que
 - $\widehat{BG} \in \mathcal{C}_1$
 - de centre K
 - de rayon KB
- . Tracer \widehat{EH} tel que
 - $\widehat{EH} \in \mathcal{C}_2$
 - de centre L
 - de rayon LE
- . Calcul M tel que
 - G \in [FG] et
 - GM = 5 toises
- . Calcul de N tel que
 - N \in [AH] et
 - HN = 5 toises
- . Calcul de C tel que
 - C \in [FC] et
 - CO = 5 toises
- . Calcul de P tel que
 - P \in [AD] et
 - DP = 5 toises
- . Calcul de Q' tel que
 - Q' \in [GC] et
 - (QQ') \perp [MO]
- . Calcul de R' tel que
 - R' \in [HD] et
 - (RR') \perp [NP]
- . Calcul de S tel que
 - S \in [QQ']
 - QS = MO
- . Calcul de T tel que
 - T \in [RR']
 - RT = NP
- . Tracer \widehat{MO} tel que
 - $\widehat{MO} \in \mathcal{C}_3$
 - de centre S
 - de rayon MO
- . Tracer \widehat{NP} tel que

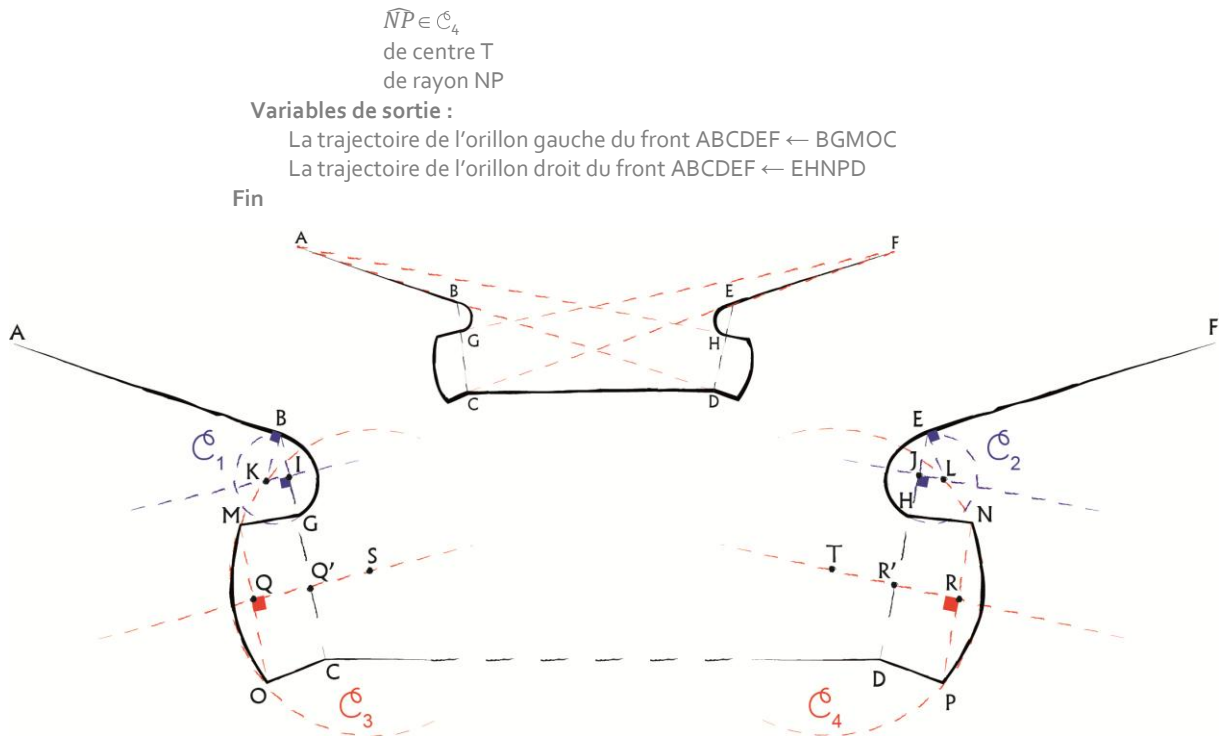


Figure 95. Création de fronts à orillons sur un front bastionné selon la méthode de Vauban telle qu'elle est rapportée par Guillaume Le Blond.

D'après: Le Blond, 1786, voir en annexe les règles de construction originales

V.2.c. Chemin couvert

Le tracé du chemin couvert à rapprocher de celui de la contrescarpe : la paroi du fossé du côté de la campagne. Elle marque la limite d'implantation des différents ouvrages extérieurs. Elle se présente comme un mur qui englobe à une certaine distance un ouvrage ; la distance pouvant varier selon l'ouvrage concerné. La cunette est quant à lui, le petit canal situé dans le fossé qui permet de drainer les eaux pluviales.

L'algorithme 4 rend compte des différentes opérations entrant en jeu dans le tracé de la contrescarpe et du chemin couvert. À partir de la trajectoire du front bastionné, deux cercles doivent être tracés. Leurs centres sont les extrémités du front, c'est-à-dire les points A et F, et leur rayon est de 18 toises. Les segments [EG] et [BH] sont tangents aux cercles \mathcal{C}_2 et \mathcal{C}_1 aux points G et H respectivement. L'intersection de ces segments devant la courtine permet de déterminer le point I. Pour le tracé de la cunette, il suffit de tracer les parallèles de l'escarpe du côté de la place à une distance de 9 toises pour obtenir la trajectoire JKL.

Algorithme 4 : Tracé la trajectoire de la contrescarpe et du chemin couvert GIH et de la cunette JK'L d'un front bastionné de Vauban selon la méthode de Guillaume Le Blond

Début

Variables d'entrée :

ABCDEF ← la trajectoire du front bastionné

Instructions :

- . Tracer le cercle \mathcal{C}_1
de centre F
de rayon 18 toises
- . Tracer le cercle \mathcal{C}_2
de centre A
de rayon 18 toises
- . Calcul de H tel que
[BH] est tangent en H à \mathcal{C}_1
- . Calcul de G tel que
[EG] est tangent en G à \mathcal{C}_2
- . I ← l'intersection de [BH] et [EG]
- . Calcul de J tel que
J ∈ [AG] et
AJ = AG/2
- . Calcul de L tel que
L ∈ [FH] et
FL = HF/2
- . Calcul de K tel que
[JK] // [GE]
[LK] // [HB] et
K ← l'intersection de [JK] et [LK]

Variables de sortie :

La trajectoire de la contrescarpe d'ABCDEF ← GIH

La trajectoire de la cunette de ABCDEF ← JK'L

Fin

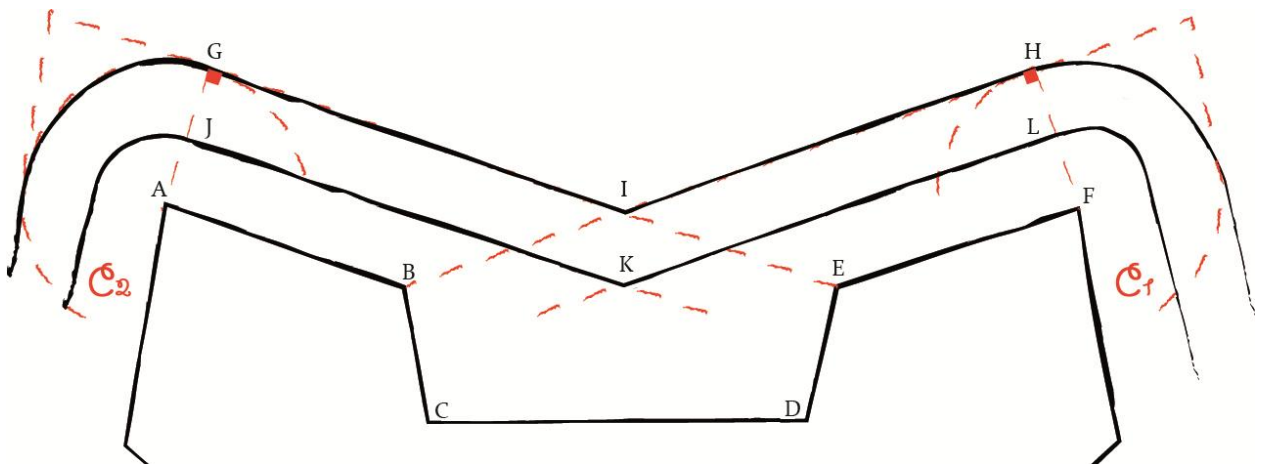


Figure 96 Création du fossé et de la contrescarpe sur un front bastionné selon la méthode de Vauban telle qu'elle est rapportée par Guillaume le Blond.

D'après : Le Blond, 1786, voir en annexe les règles de construction originales

V.2.d. Tenaille

La tenaille est un ouvrage extérieur placé immédiatement devant la courtine d'un front. Elle peut être simple, c'est-à-dire composée de deux faces formées par le prolongement des faces du front (Figure 97), à pans coupés (au lieu de se rencontrer en angle, les faces sont réunies par un petit front droit) ou encore bastionnée (la tenaille est alors composée alors de deux faces, deux flancs et une courtine [Figure 99], à l'image du le tracé d'un front bastionné).



Figure 97. Une tenaille simple sur le plan-relief de Lille.

D'après photo RMN Musée des Plans-reliefs / René-Gabriel Ojéda RMNGP

L'algorithme 5, présenté ci-après, permet le tracé de la trajectoire de la tenaille simple. Il nécessite le tracé du front bastionné et en particulier de la courtine dont il faut tracer une parallèle du côté de la campagne à une distance de 3 toises. Après avoir tracé les parallèles à [CB] et [DE] à une distance de 5 toises, l'intersection de ces segments avec les demi-droites [AB) et (FE) permet d'obtenir les points I et E respectivement tandis que l'intersection des demi-droites [AB) et (FE) donne le point K. IK et KJ sont les faces de la tenaille simple.

Algorithme 5 : Tracer la trajectoire de la tenaille simple IKJ de Vauban selon Guillaume Le Blond :

Début

Variables d'entrée :

ABCDEF \leftarrow la trajectoire du front bastionné

Instructions :

- . Calcul de G tel que
G \in [BC] et
(GH) // [CD] tel que
d(G,[CD]) = 3 toises
- . Calcul de I tel que
I \in [AB] et
(G'I) // [CB] tel que
d(G',[CD]) = 5 toises
- . Calcul de J tel que
J \in [FE] et
(H'J) // [DE] tel que
d(H',[DE]) = 5 toises
- . K \leftarrow l'intersection de [AB] et [ED]

Variables de sortie :

La trajectoire de la tenaille simple \leftarrow IKJ

Fin

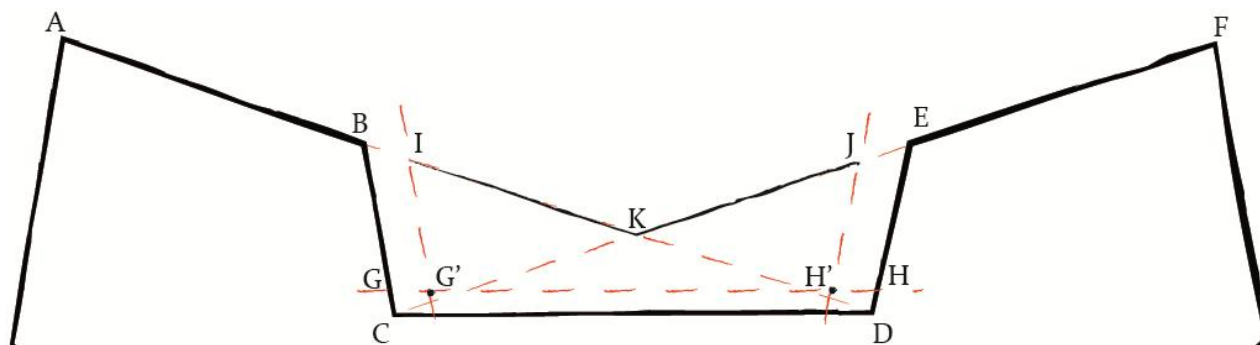


Figure 98. Création d'une tenaille sur un front bastionné selon la méthode de Guillaume le Blond.

D'après : Le Blond, 1786, voir en annexe les règles de construction originales

La tenaille bastionnée tient son nom de la forme adoptée par la tête de l'ouvrage. Composée de deux faces, deux flancs et une courtine, cette tenaille reprend le tracé d'un front bastionné de remparts ou d'enceinte (Figure 99). L'algorithme de la tenaille simple est réutilisé et complété pour le dessin de la trajectoire de la tenaille bastionnée.



Figure 99. Une tenaille bastionnée sur le plan-relief de Huningue devant un rempart dont les flancs sont pourvus d'orillons.

D'après photo Musée des Plans-reliefs / fonds Feullie

L'algorithme 6 permet le dessin d'une variante de la tenaille simple : la tenaille bastionnée. Les opérations décrites dans l'algorithme 5 sont complétées par la création des points L et M, situés au milieu des segments [IK] et [KJ]. Le projeté orthogonal des points L et M sur les demi-droites [FE) et (AB) respectivement, permet d'obtenir les points N et O respectivement. LN et MO sont les flancs de la tenaille bastionnée tandis que NO est sa courtine. Avec les faces IL et JM, ces lignes forment la trajectoire de la tenaille bastionnée.

Algorithme 6 : Tracer la trajectoire de la tenaille bastionnée ILNOMJ de Vauban selon Guillaume Le Blond :

Début

Variables d'entrée :

ABCDEF ← la trajectoire du front bastionné

Instructions :

- . Calcul de G tel que
 $G \in [BC]$ et
 $(GH) \parallel [CD]$ tel que
 $d(G, [CD]) = 3 \text{ toises}$
- . Calcul de I tel que
 $I \in [AB]$ et
 $(G'I) \parallel [CB]$ tel que
 $d(G', [CD]) = 5 \text{ toises}$
- . Calcul de J tel que
 $J \in [FE]$ et
 $(H'J) \parallel [DE]$ tel que
 $d(H', [DE]) = 5 \text{ toises}$
- . $K \leftarrow$ l'intersection de [AB) et (ED)
- . Calcul de L tel que
 $L \in [IK]$ et
 $IL = IK/2$
- . Calcul de M tel que
 $M \in [JK]$ et
 $JM = JK/2$
- . $N \leftarrow$ le projeté orthogonal de L sur [FC)
- . $O \leftarrow$ le projeté orthogonal de M sur (AD]

Variable de sortie :

La trajectoire de la tenaille bastionnée ← ILNOMJ

Fin

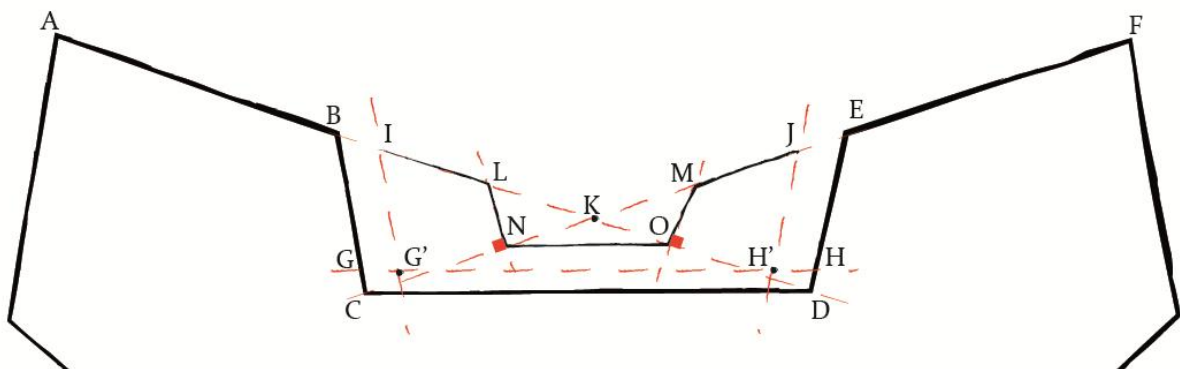


Figure 100. Création d'une tenaille à flanc et son fossé sur un front bastionné selon la méthode de Guillaume le Blond.
 D'après : Le Blond, 1786, voir en annexe les règles de construction originales

V.2.e. Demi-lune

La demi-lune est également un ouvrage extérieur placé devant la tenaille, ou en absence de tenaille devant la courtine d'un front. La demi-lune théorique est composée de deux faces, formant un angle saillant vers la campagne, qui peuvent être complétée par deux flancs qui joignent les faces à la gorge de l'ouvrage.



Figure 101. Une demi-lune à flanc sur le plan-relief de Toul.

Photo : auteur

Les différentes opérations nécessaires au tracé de la trajectoire de la demi-lune sont présentées dans l'algorithme 7. Ces opérations reposent sur le tracé du front bastionné et du chemin couvert qui ont déjà été présentés. Ainsi, les points B' et E' sont situés sur les segments [AB] et [EF] à une distance de 5 toises de B et de E respectivement. Du point H, situé au milieu de [AB], est tracée la médiatrice [HI] avec le point I étant l'intersection du cercle de centre C et de rayon CE. Les segments [B'I] et [E'I] coupe le chemin couvert en M et L respectivement. Pour obtenir les flancs de la demi-lune MIL, il est encore nécessaire de déterminer les points O et P, situés sur [MI] et [LI] à une distance de 10 toises de M et de L respectivement, ainsi que les points Q et R, situés sur [MK] et [KL] à une distance de 7 toises de M et de L respectivement. OQ et PR sont les flancs de la demi-lune MIL.

Algorithme 7 : Tracer la trajectoire de la demi-lune à flancs QOIPR de Vauban selon Guillaume Le Blond :

Début

Variables d'entrée :

ABCDEF ← la trajectoire du front bastionné

JKN ← la trajectoire du chemin couvert du front ABCDEF

Instructions :

- . Calcul de B' tel que
B' ∈ [BA] et
BB' = 5 toises
- . Calcul de E' tel que
E' ∈ [EF] et
EE' = 5 toises
- . Calcul de [GH] tel que
H ∈ [AF] et
[GH] ⊥ [AF]
- . Calcul de I tel que
I ∈ [GH] et
CI = CE'
- . M ← l'intersection de [JK] et [B'I]
- . L ← l'intersection de [KN] et [E'I]
- . Calcul de O tel que
O ∈ [MI] et
MO = 10 toises
- . Calcul de P tel que
P ∈ [LI] et
LP = 10 toises
- . Calcul de Q tel que
Q ∈ [MK] et
MQ = 7 toises
- . Calcul de R tel que
R ∈ [LK] et
LR = 7 toises

Variables de sortie :

La trajectoire de la demi-lune à flanc d'ABCDEF ← QOIPR

Fin

La demi-lune s'implante entre le front et le glacis, ce qui résulte en une modification du tracé du fossé qui forme une enveloppe, c'est-à-dire un terrain défensif entourant un ouvrage fortifié et débordant sur le glacis. L'algorithme 8 rend compte des opérations nécessaires à la modification du tracé du chemin couvert. Il est nécessaire de positionner les points S et U appartenant aux segments [JM] et [NL] à une distance de 12 toises de M et de L respectivement. Les parallèles à [LI] et [MI] passant par les points U et S s'intersectent au point T. Après avoir appliqué un congé à STU au point T, le tracé complet de l'escarpe est obtenu.

Algorithme 8 : Tracé de la trajectoire du fossé STU de la demi-lune de Vauban selon Guillaume Le Blond

Début

Variables d'entrée :

ABCDEF ← la trajectoire du front bastionné

QOIPR ← la trajectoire de la demi-lune à flancs ABCDEF

JKL ← la trajectoire du chemin couvert du front ABCDEF

Instructions :

. Calcul de S tel que

$S \in [MJ]$ et

$MS = 12$ toises

. Calcul de U tel que

$U \in [LN]$ et

$LU = 12$ toises

. Calcul de T tel que

$[UT] \parallel [LI]$

$[ST] \parallel [MI]$ et

$T \leftarrow$ l'intersection de $[ST]$ et $[UT]$

. Congé sur le sommet T de rayon r

Variables de sortie :

La trajectoire du fossé de la demi-lune $QOIPR \leftarrow STU$

Fin

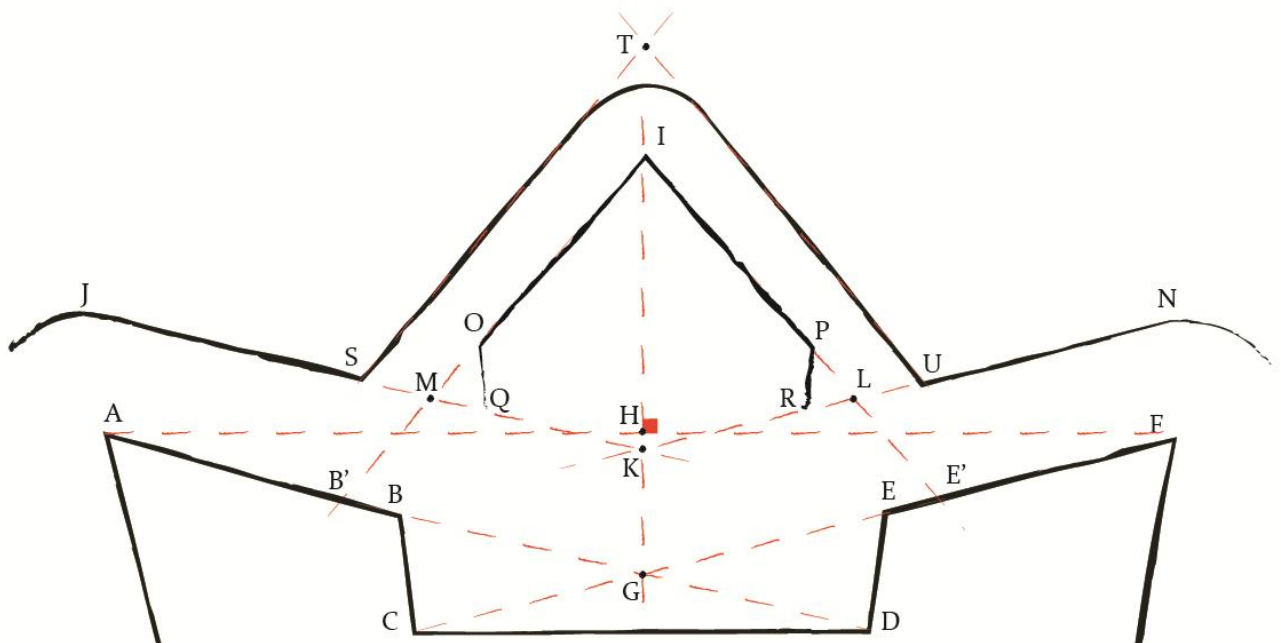


Figure 102 Création d'une demi-lune à flancs et son fossé sur un front bastionné selon la méthode de Guillaume Le Blond.
D'après : Le Blond, 1786, voir en annexe les règles de construction originales

V.2.f. Ouvrage à corne

L'ouvrage à corne est un ouvrage extérieur dont la tête est un front bastionné qui est relié à la gorge par deux ailes. L'ouvrage à corne peut se rencontrer à deux positions différentes nécessitant deux approches elles aussi différentes. Cet ouvrage peut se trouver devant le front bastionné, en avant d'une demi-lune qui en devient son réduit ou devant un bastion. C'est ce dernier cas qui va être développé en raison de sa présence à deux reprises sur le plan-relief de Strasbourg.



Figure 103. Un ouvrage à corne sur le plan-relief de Strasbourg.

Photo: auteur

L'algorithme 9 présente les différentes opérations nécessaires au tracé de la trajectoire d'un ouvrage à corne situé devant un bastion. Il est nécessaire de disposer des trajectoires du bastion, c'est-à-dire des deux fronts bastionnés partageant ce bastion, de leurs demi-lunes, ainsi que de leurs chemins couverts respectives. On calcule ensuite la position du point F situé sur la demi-droite [C'C) à une distance de C de 100, 120 ou 130 toises selon que la distance des côtés extérieurs des fronts bastionnés est de 160, 180 ou 200 toises. Le tracé de la médiatrice à [C'C) passant par F permet d'obtenir les points G et H à une distance de 70 toises de F. Les demi-droites [GF') et [HF') s'intersectent en F' situé sur [FC') à une distance de F égale à un sixième de GH. Les points I et J, situés sur les segments [GF') et [HF'), sont à une distance de G et de H égale à deux septième de GH, tandis que les points K et L, appartenant aux demi-droites [HF') et [GF'), sont à une distance égale à HI et GJ respectivement. GIKLJH est la trajectoire du front bastionné de l'ouvrage à corne auquel il faut rajouter les ailes GX et HY pour obtenir la trajectoire complète de l'ouvrage. Les points X et Y s'obtiennent par l'intersection du tracé du chemin couvert de chacune des demi-lunes avec les droites issues de G et de H et passant par les points O' et P' appartenant à [NO] et [PQ] et situés à 15 toises de O et de P. GX et HY sont les ailes complétant le tracé du front bastionné GIKLJH et qui forment ensemble la trajectoire XGIKLJHY de l'ouvrage à corne.

Algorithme 9 : Tracé de la trajectoire de l'ouvrage à corne XGIKLJHY de Vauban selon Guillaume Le Blond

Début

Variables :

ABCDE ← la trajectoire d'un bastion
 n ← nombre de fronts
 MNO ← la trajectoire de la demi-lune à gauche du bastion ABCDE
 PQR ← la trajectoire de la demi-lune à droite du bastion ABCDE
 STUV ← la trajectoire du chemin couvert de MNO, PQR et ABCDE

Instructions :

. Calcul F tel que
 $F \in [C'C]$
Selon n
 petit : $CF \leftarrow 100$ toises
 moyen : $CF \leftarrow 120$ toises
 grand : $CF \leftarrow 130$ toises

FinSelon

. Calcul de G tel que
 $(GF) \perp [FC]$
 $GF = 70$ toises
 . Calcul de H tel que
 $[FH] \perp [FC]$
 $FH = 70$ toises
 . Calcul de F' tel que
 $F' \in [FC]$ et
 $FF' = GH/6$
 . Calcul de I tel que
 $I \in [GF']$ et
 $GI = GH \times 2/7$
 . Calcul de J tel que
 $J \in [HF']$ et
 $HJ = GH \times 2/7$
 . Calcul de L tel que
 $L \in [GF']$ et
 $GL = GJ$
 . Calcul de K tel que
 $K \in [HF']$ et
 $HK = HI$
 . Calcul de O' tel que
 $O' \in [ON]$ et
 $OO' = 15$ toises
 . Calcul de P' tel que
 $P' \in [PQ]$ et
 $PP' = 15$ toises
 . X ← l'intersection de (GO') et (ST)
 . Y ← l'intersection de (HP') et (VW)

Variable de sortie :

XGIKLJHY ← la trajectoire de l'ouvrage à corne

Fin

À l'image de la demi-lune, l'ouvrage à corne modifie le tracé du chemin couvert pour former une enveloppe autour du nouvel ouvrage. L'algorithme 10 énumère les différentes opérations requises pour le tracé de la trajectoire d'un tel chemin couvert. Deux demi-droites issues de J et de I et tangentes aux cercles de centre G et H et de rayon 12 toises s'intersectent en Z pour former la trajectoire du chemin couvert devant le front bastionné de l'ouvrage à corne. Deux parallèles à [GX] et à [HY] sont également tangentes aux cercles C_2 et C_1 . L'intersection de ces lignes avec le chemin couvert initial donne les points X' et Y'. Ainsi obtient-on le chemin couvert de l'ouvrage à corne au niveau de ses ailes.

Algorithme 10 : Tracer de la trajectoire de la contrescarpe et du chemin couvert X'G₂G₁ZH₁H₂Y' de l'ouvrage à corne selon Guillaume Le Blond

Début

Variables d'entrée :

XGIKLJHY ← la trajectoire de l'ouvrage à corne

STUV ← la trajectoire du chemin couvert de MNO, PQR et ABCDE

Instructions :

- . Tracer C_1
de centre G
de rayon 12 toises
- . Tracer C_2
de centre H
de rayon 12 toises
- . Calcul de Z tel que
[JG₁] est tangent en G₁ à C₁
[IH₁] est tangent en H₁ à C₂
Z ← l'intersection entre [JJ'] et [II']
- . Calcul de G₂ tel que
[X'G₂] est tangent en G₂ à C₁
- . Calcul de H₂ tel que
[Y'H₂] est tangent en H₂ à C₂

Variable de sortie :

X'G₂G₁ZH₁H₂Y' ← la trajectoire du fossé de l'ouvrage à corne XGIKLJHY

Fin

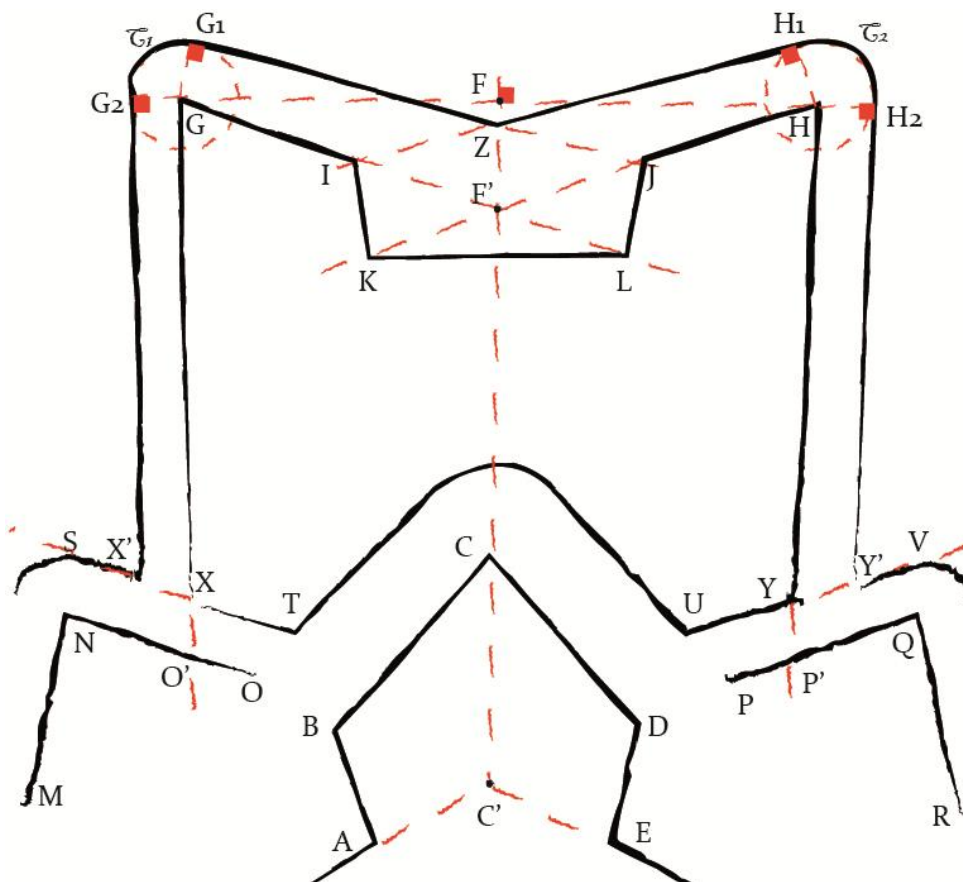


Figure 104 Création d'un ouvrage à corne devant un bastion, de son fossé et de son escarpe selon la méthode de Guillaume Le Blond.

D'après : Le Blond, 1786, voir en annexe les règles de construction originales

V.3. Ajustement manuel des trajectoires des ouvrages précédents à des données extérieures

Quatre aspects doivent être pris en compte pour la création des composants Grasshopper destinés à l'ajustement géométrique des trajectoires qui viennent d'être implémentées sur des données existantes (cartes, relevés tridimensionnels, etc.).

Tout d'abord, il est nécessaire d'apporter une première modification aux composants de trajectoire afin de les exempter d'un paramètre théorique entravant tout ajustement. En effet, nombreuses sont les méthodes à requérir une longueur de côté extérieur précise qui va influencer le tracé des différentes parties de la trajectoire. Citons par exemple les quatre méthodes existantes pour le tracé du front de Cormontaigne selon que la longueur du côté intérieur est de 120, 130, 140 ou 150 toises. Pour Vauban, même si la valeur de 180 toises est une norme pour la longueur du côté extérieur, la méthode de construction peut être utilisée pour n'importe quelle valeur. Certains de ses paramètres, comme la longueur de la perpendiculaire, sont relatifs à la longueur du côté extérieur et non pas absolus comme dans le cas de Cormontaigne (Figure 94). La solution mise en œuvre est relativement simple puisqu'à partir des deux points placés manuellement lors de la création de la trajectoire théorique du front, on obtient la longueur du côté extérieur ou intérieur. Celle-ci est comparée aux valeurs théoriques acceptées afin de sélectionner la situation théorique la plus proche et d'en appliquer les règles dans la suite de la construction.

Le second aspect à prendre en compte pour la phase d'ajustement résulte du nombre de méthodes existantes pour la création de chaque type de trajectoire. Même si pour un type de trajectoire, le rôle et le nombre de lignes sont les mêmes, aucune méthode ne s'appuie sur les mêmes tracés géométriques pour y parvenir⁹⁴. Ainsi, l'ajustement d'une trajectoire peut être réalisé soit :

- à partir des paramètres énoncés dans les règles de construction des différents ouvrages de fortification bastionnée, mais alors, les paramètres sont différents d'un ingénieur à l'autre pour un même ouvrage ;
- à partir de paramètres communs et dans ce cas, les entités manipulées lors de l'ajustement sont les lignes composant la trajectoire de l'ouvrage.

Prenons le cas d'un front bastionné, les traits de construction de la méthode de Vauban ne sont pas les mêmes que ceux présents dans la méthode de Cormontaigne ou d'autres ingénieurs. Un composant d'ajustement unique n'est pas possible, chaque trajectoire faisant appel à des lignes de constructions spécifiques. La définition de la trajectoire d'un front nous donne une alternative pour rendre universel un composant d'ajustement de front, car les composants d'un front sont les mêmes qu'elle que soit l'ingénieur : deux faces, deux flancs et une courtine (Figure 105).

⁹⁴ Se référer aux différentes trajectoires de rempart en annexes page 230

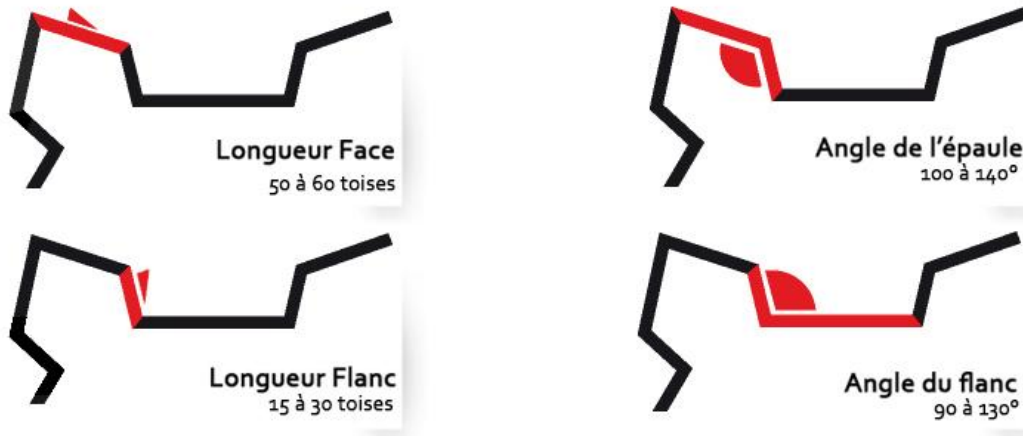


Figure 105. Les paramètres communs aux différentes méthodes de construction ont été identifiés comme paramètres d'ajustement. Les plages de valeurs communément rencontrées sont précisées.

Un autre aspect qui a favorisé le choix d'un composant d'ajustement universel avec des paramètres communs plutôt que par les lignes de construction et la difficulté que peut représenter l'ajustement d'un front dont on n'ajuste pas, au demeurant, les lignes finales. Les manipulations sont alors fastidieuses surtout sur des trajectoires complexes telles que sont les orillons. L'exemple de la trajectoire de Vauban et de ses paramètres théoriques met en évidence la difficulté d'effectuer des ajustements à partir de paramètres théoriques. Le paramètre manipulé, en rouge, permet de modifier de manière indirecte les lignes formant la trajectoire. La longueur de la perpendiculaire va influencer l'angle formé par le côté extérieur et la face (Figure 106, a), tandis que la longueur de cette dernière dépend de la longueur du même côté extérieur : la longueur de la face vaut deux sixièmes de celle du côté selon la théorie (Figure 106, b). Enfin, le dimensionnement de la courtine et du flanc s'opère par la ligne de défense dont l'angle par rapport au côté extérieur est donné par la direction de la face et la longueur par rapport aux longueurs des faces (Figure 106, c).



Figure 106. Le premier paramètre contrôle l'angle formé par les faces et le côté extérieur par l'intermédiaire d'une perpendiculaire dont on peut varier la longueur (a). Le second paramètre contrôle la longueur des faces en fonction de la longueur du côté extérieur (b). Le dernier paramètre contrôle la position du sommet formée par la courtine et les flancs (c) par rapport à la longueur du segment reliant le sommet du bastion opposé à l'angle de l'épaule.

Enfin, quel que soit le type de paramètres manipulés lors de l'ajustement il est apparu essentiel que les paramètres puissent être asymétriques. (Figure 107). Lors de la présentation des méthodes de construction des trajectoires dans les traités de fortification, il n'est pas fait mention de la possibilité que la gauche et la droite d'une trajectoire puissent être différentes. Pourtant, dès les premiers tests d'ajustement sur des données relevées, on se heurte directement à ce problème. La solution adoptée met à profit la capacité de Grasshopper à gérer des listes de données. Pour une entrée de composant d'ajustement de trajectoire (angle

diminué par exemple), il est possible de connecter un paramètre d'ajustement de ligne – et dans ce cas, la modification est appliquée aux deux lignes de même type – ou de connecter deux paramètres d'ajustement – et dans ce cas, à chaque paramètre est associée une ligne (Figure 107).

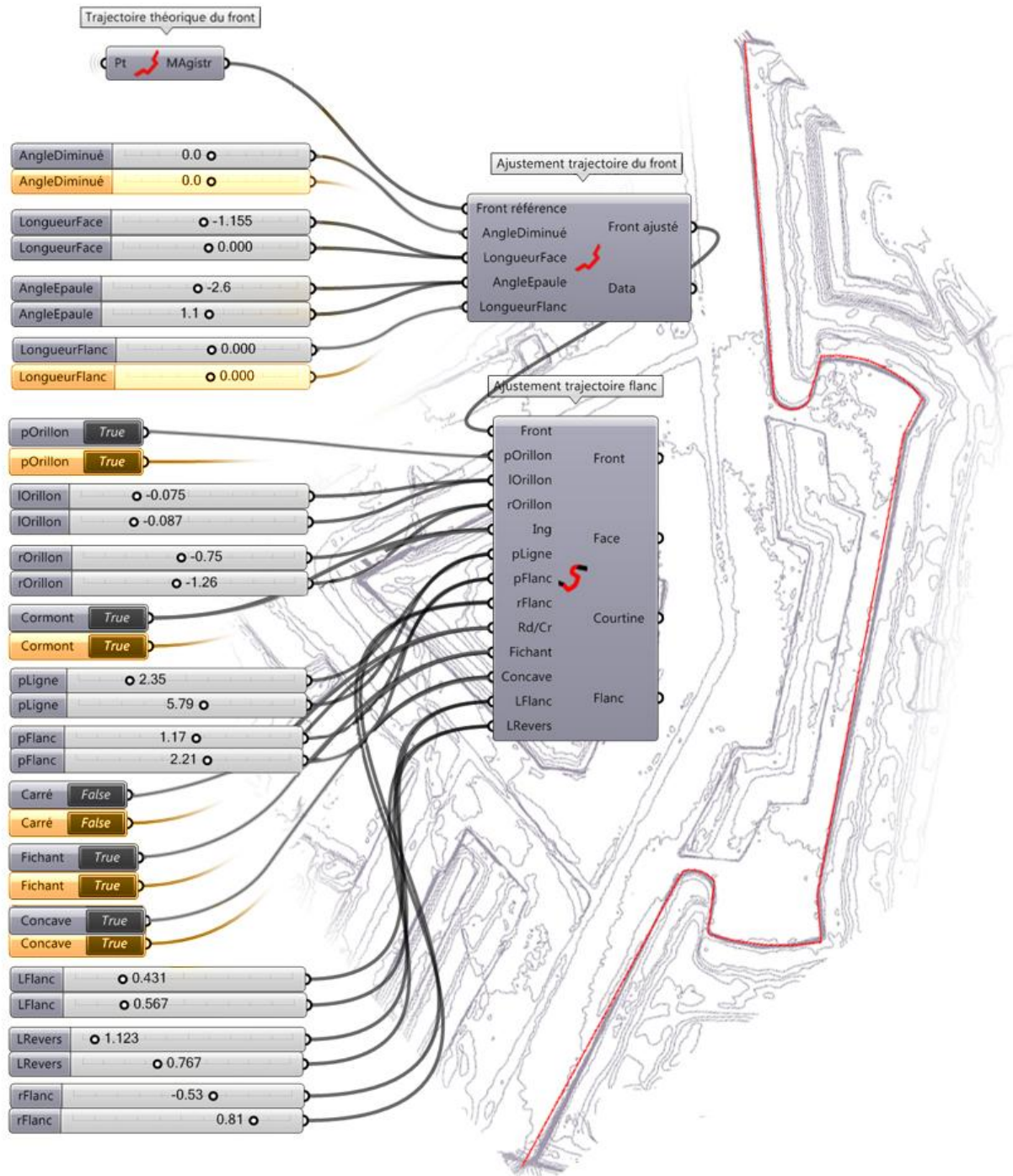


Figure 107. Composants d'ajustement de la trajectoire d'un front théorique et de ses flancs à orillons avec les paramètres communs aux différentes méthodes de construction. Les paramètres, visibles à gauche, sont doublés afin de contrôler le côté gauche et le côté droit des trajectoires du front et des orillons et ainsi permettre un ajustement optimal sur les données relevées (le front 0 du plan-relief de Strasbourg). Lorsque la même valeur est affectée aux deux côtés, un des deux paramètres peut être supprimé (les paramètres orangés).

Grâce à ces paramètres d'ajustement, il est possible de reconstruire précisément les trajectoires des différents ouvrages de fortification présents sur les relevés des plans-reliefs. La préférence accordée à des paramètres universels plutôt que théoriques et la possibilité d'avoir des valeurs asymétriques nous garantisent une parfaite fidélité des tracés reconstruits aux données relevées dans la limite de l'erreur graphique⁹⁵. Malgré ces précautions, l'étape d'ajustements, dès lors qu'elle est menée manuellement, est fastidieuse et peu précise. L'automatisation des ajustements que nous proposons dans le cadre de la rétroconception des trajectoires des ouvrages (Figure 108, c) permet d'optimiser les temps et la précision de la reconstruction.

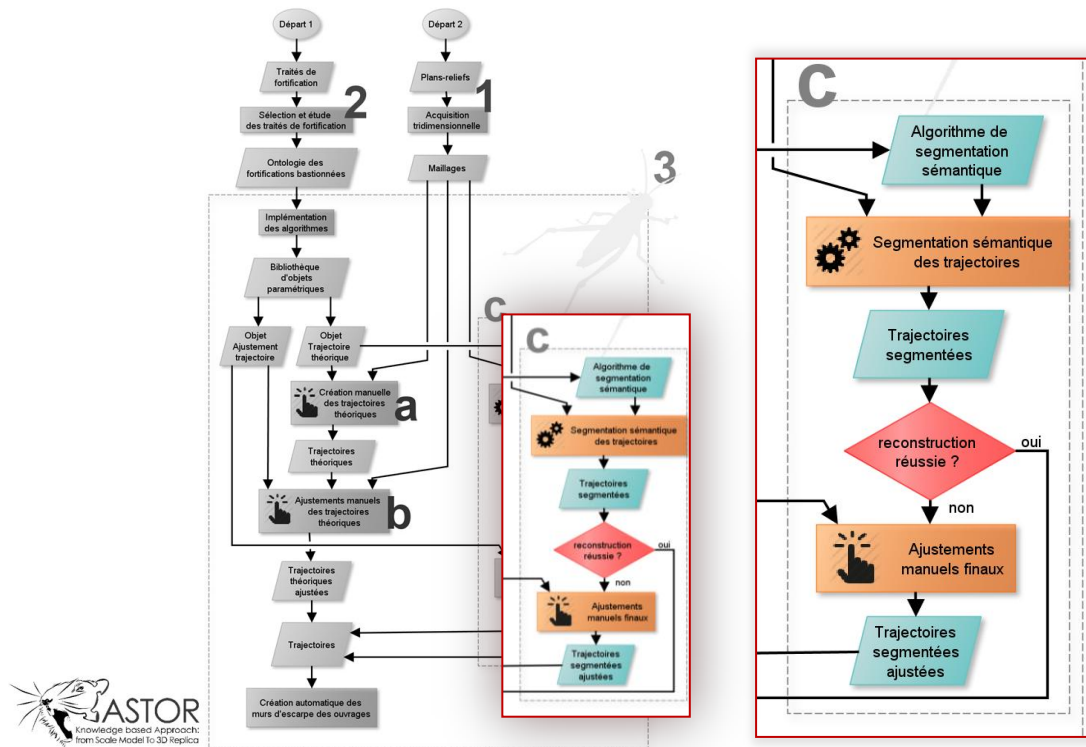


Figure 108. Les opérations manuelles de reconstruction (a et b) permettent de reconstruire précisément les trajectoires des ouvrages de fortification, mais pour accroître la vitesse et la précision de la reconstruction, une automatisation de la reconstruction est proposée (c).

V.4. Extraction automatique des données nécessaires à la reconstruction des ouvrages de fortification.

Pour pouvoir ajuster automatiquement des trajectoires paramétriques, il est nécessaire de segmenter géométriquement les données d'entrée du processus de reconstruction. Un nuage de points ou même un maillage constitue un modèle 3D beaucoup trop complexe du fait du nombre de données et d'éléments présents, aussi est-il requis de filtrer les informations contenues dans ces scènes 3D.

Dans la partie V.4.a, une première série d'expérimentations de segmentation sémantique est menée sur les fortifications. Elle s'appuie sur des logiciels commercialisés proposant des traitements de segmentation et même de reconstruction géométrique. Les résultats produits par ces logiciels n'étant pas con-

⁹⁵ On admet en général que lorsqu'on opère à l'oeil nu, l'erreur graphique présente un écart-type d'un dixième de millimètre (Association Française de Topographie, 2012).

cluants, nous avons ensuite recours à Grasshopper pour implémenter des algorithmes de segmentation adaptés à nos besoins. Ce dernier point est l'objet de la partie V.4.b.

V.4.a. Segmentation des données relevées avec des logiciels existants

Des logiciels de traitements de données acquises par numérisation tridimensionnelle proposent depuis plusieurs années déjà des opérations de segmentation géométrique. Dans la Partie A.III.3.a, intitulée : Segmentation géométrique, nous avons évoqué la capacité de Geomagic Studio à mener de telles opérations. Ce logiciel, ainsi que Mesh2Surface⁹⁶ et Rapidform XOR 3 ont pu être testés dans le cadre de notre projet. Bien qu'initialement sur les fortifications, ces expérimentations ont surtout été menées sur les bâtiments présents sur les plans-reliefs (Giraud, 2013).

Quel que soit le programme choisi, la segmentation s'opère sur un maillage qui doit préalablement être corrigé par des opérations déjà citées en Partie A.III.2. Ces opérations de correction ont pour objectif la suppression de géométries pouvant perturber le processus de segmentation géométrique à l'image de triangles du maillage en forme de pics, de trous de très petites dimensions, de normales de faces mal orientées, etc. Cette tâche ne peut être menée de manière automatique, car la présence d'objets de petites dimensions ou complexes comme les arbres, barrières, etc. nécessite une suppression au cas par cas et une reconstruction manuelle. La reconstruction du terrain est sans doute l'opération la plus délicate, car il est nécessaire d'extrapoler la géométrie qui a été masquée par la végétation (Figure 109).



Figure 109. Le maillage utilisé pour l'opération de segmentation (a) doit être dépourvu de géométries aberrantes telles que les trous de petite taille ou les pics formés par des triangles qui peuvent se croiser comme c'est le cas de la végétation des plans-reliefs (b). De plus, la suppression de ces géométries oblige l'utilisateur à intervenir dans la phase de prétraitement des données relevées pour reconstruire les parties masquées par la végétation.

Une fois le maillage optimisé pour la segmentation, les programmes diffèrent dans leur fonctionnement. Mesh2Surface procède en la division du maillage selon la direction des normales dont les normales dépassent une valeur limite. C'est ensuite à l'utilisateur de spécifier l'appartenance des maillages divisés à trois modèles géométriques paramétriques définis dans la bibliothèque de Mesh2Surface : plan, sphère et cylindre. Enfin, des opérations de reconstruction géométrique, puis de raccordements des surfaces créées produisent un modèle géométrique non plus formé de milliers de triangles, mais d'un nombre

⁹⁶ <http://www.mesh2surface.com/>

limité d'entités géométriques. Cependant, le manque de paramètres d'ajustement pour le processus de segmentation et la quasi-absence d'opérations de reconstruction nous fait préférer la segmentation avec Geomagic Studio.

Geomagic permet dans un premier temps de détecter et de classer les surfaces selon leur appartenance à l'un des modèles géométriques présents dans le logiciel. La segmentation ainsi opérée est automatique, mais l'intervention de l'utilisateur reste possible. Il est ainsi possible de modifier de nombreux paramètres dont la sensibilité aux courbes : un paramètre qui influence directement le nombre de divisions du maillage. Plus la valeur de ce paramètre est élevée, plus petites sont les régions identifiées. L'épaisseur des séparateurs (tracés rouges, Figure 110) est un paramètre dont l'utilisation sur les fortifications est elle aussi problématique, car à l'inverse des maisons, les ouvrages défensifs sont composés d'objets présentant de grandes variétés de tailles (Figure 111). Une escarpe et une banquette de tir ne peuvent être identifiées avec la même valeur d'épaisseur des séparateurs ou avec la même valeur de sensibilité aux courbes. La correction manuelle est alors inévitable pour redéfinir les limites des objets que l'on cherche à extraire. En ce qui concerne les fortifications, ce processus est extrêmement fastidieux et imprécis puisqu'il est nécessaire pour l'utilisateur d'extrapoler la position des séparateurs.

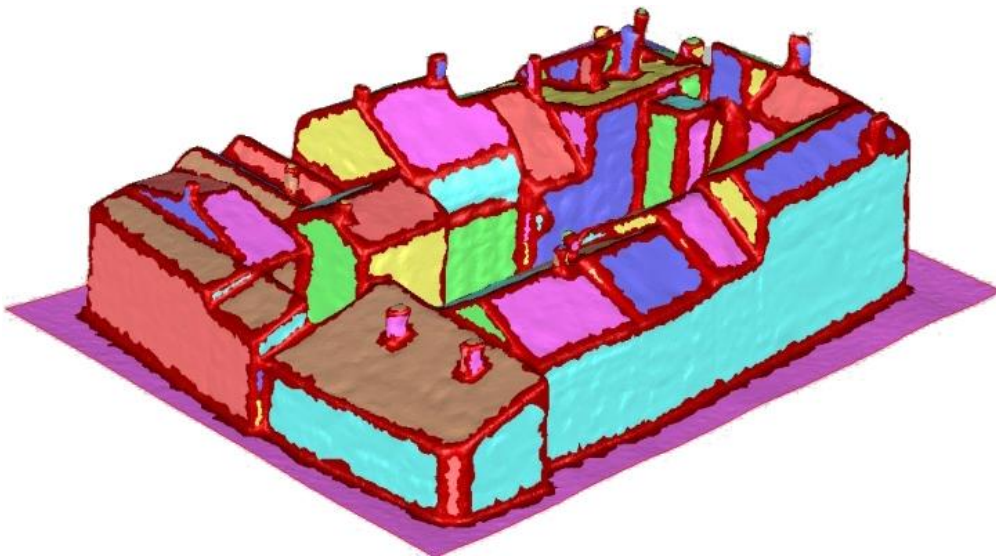


Figure 110. Segmentation de la géométrie des bâtiments sur Geomagic.
D'après : Giraud et al., 2013

La Figure 111, a représente la segmentation d'un maillage du front du plan-relief de Toul. À chaque couleur est associée une région composée de facettes contiguës dont les normales ont des valeurs proches. Ces régions sont ensuite qualifiées en fonction de surfaces (plan, cylindre, cône, sphère, mais aussi, surface d'extrusion, de balayage, etc.) de la bibliothèque du logiciel (Figure 111,b). Il est toujours possible de modifier les surfaces identifiées automatiquement par le logiciel en changeant la typologie ou en l'associant à une surface voisine qui aurait pu être segmentée à tort. Geomagic propose ensuite un processus de reconstruction géométrique des surfaces précédemment retrouvées. La Figure 111,c illustre le front après le processus de reconstruction. Certaines surfaces n'ont pu être reconstruites, à l'image d'une partie du glacis (en vert). Enfin, une opération permet d'automatiser la reconstruction des raccordements entre les différentes surfaces.

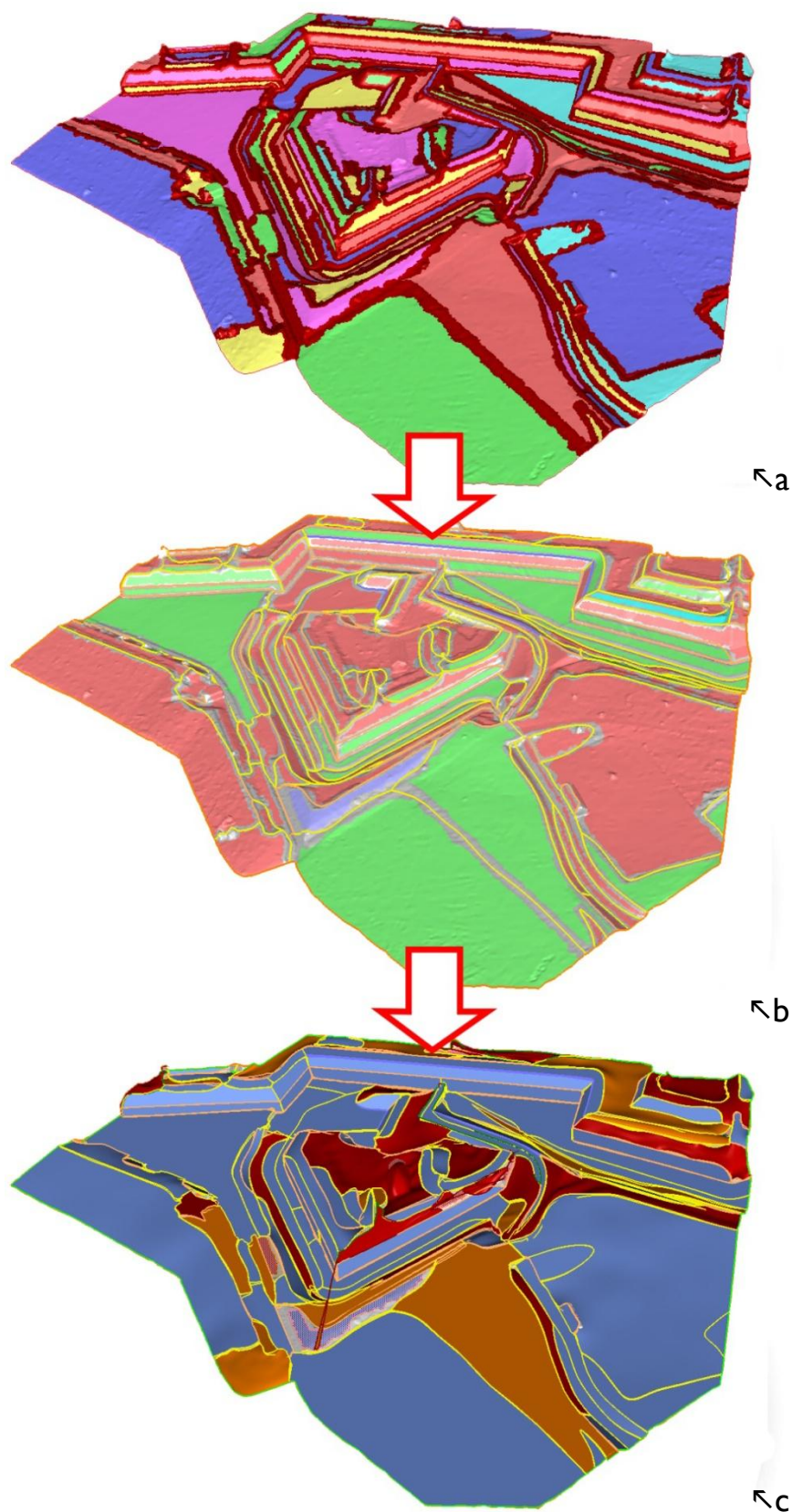


Figure 111. Reconstruction de la géométrie sur Geomagic. Des régions sont identifiées d'après la direction des normales composant leurs facettes (a). Les régions sont ensuite qualifiées en fonction des types de surfaces présentes dans la bibliothèque du logiciel (b) avant qu'il n'ajuste automatiquement une surface unique pour chaque région (c).

Même s'il est possible de segmenter et de reconstruire une grande partie des fortifications à l'aide de logiciels existants, il n'en demeure pas moins que les interventions humaines occupent une part importante de ce processus. De plus, la segmentation étant uniquement géométrique – les modèles géométriques contenus dans les bibliothèques d'objets paramétriques ne permettent pas d'identifier les différentes entités présentes en fortification bastionnée, mais uniquement des plans, sphères, etc. – le modèle produit est donc dépourvu de toute sémantique. Il apparaît dès lors essentiel de faire intervenir les connaissances *a priori* en fortification bastionnée pour appuyer la segmentation des données brutes et la reconstruction géométrique des ouvrages. Ainsi, la méthode KASToR n'a pas recours à une segmentation géométrique telle que réalisée par les outils que nous venons de présenter, mais applique directement une segmentation sémantique des données relevées.

V.4.b. Segmentation sémantique des trajectoires des ouvrages

Le processus de segmentation sémantique et de reconstruction des trajectoires des ouvrages de fortification bastionnée est composé de plusieurs opérations pour lesquelles nous allons détailler le contenu dans la suite de cette étude. Le Diagramme 1 est une représentation synthétique des principales opérations menées pour parvenir à la segmentation des trajectoires des ouvrages de fortification bastionnée.

La première opération, **A. Création des côtés extérieurs approximatifs des fronts**, est réalisée sur le maillage issu des données relevées. Elle a pour objectif la transformation du maillage en une géométrie composée uniquement de segments coplanaires (des courbes de niveau n'appartenant qu'à un seul et unique plan) et la création des différents côtés extérieurs approximatifs des fronts bastionnés (Figure 112, b).

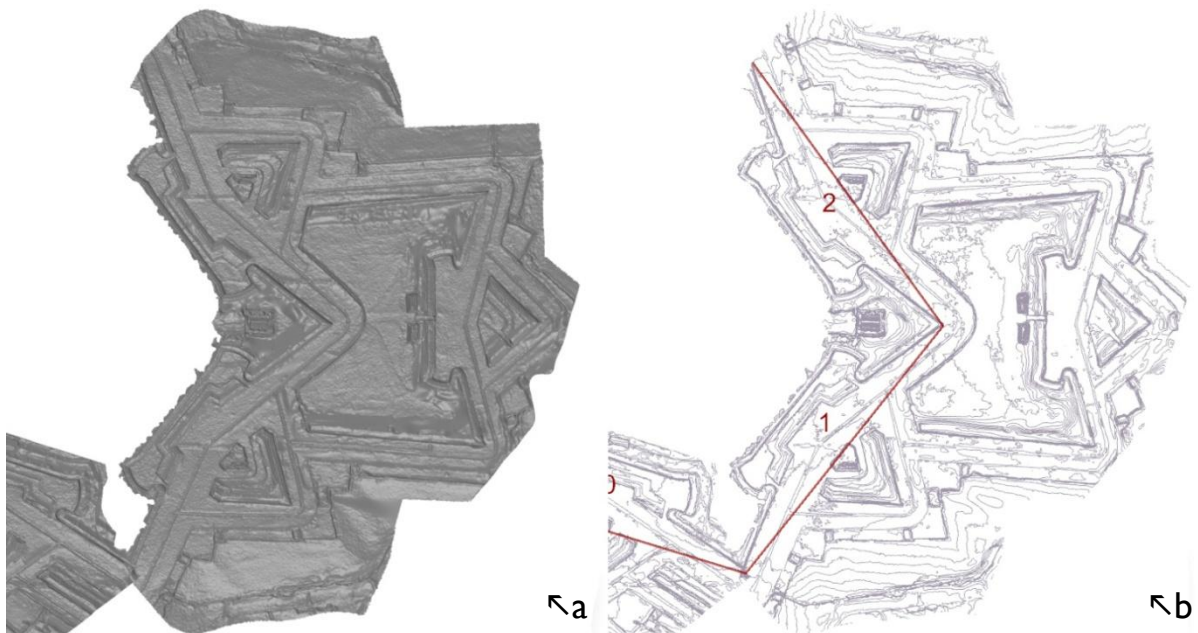


Figure 112. L'opération A permet, à partir du maillage des fortifications de Strasbourg (a) d'obtenir des lots de segments (b en gris) ainsi que les côtés extérieurs des différents fronts (b, en rouge et numéroté de 0 à 2).

Dès lors, les opérations sont menées en parallèle sur chaque côté extérieur précédemment identifié. Chacun de ces côtés est ensuite utilisé comme paramètre dans l'opération **B. Définition d'une surface englobant la trajectoire du front** pour la création d'une surface à partir de la trajectoire théorique de type front dont les règles de construction sont issues de l'ontologie de la fortification bastionnée décrite dans la partie V.4.b.b. Cette surface est ensuite utilisée pour intersecter les segments produits par l'opération A afin d'isoler un lot restreint de segments parmi lesquels se trouve la trajectoire réelle de l'ouvrage.

L'opération intitulée : **1. Création de la trajectoire des ouvrages**, requiert la trajectoire théorique du front ainsi que le lot de segments produits lors de la précédente intersection. À partir des segments appartenant à la surface englobant la trajectoire du front réel et de la trajectoire théorique du même ouvrage (Figure 113, a), l'opération 1 permet d'extraire parmi les segments la trajectoire réelle du front (Figure 113, b).

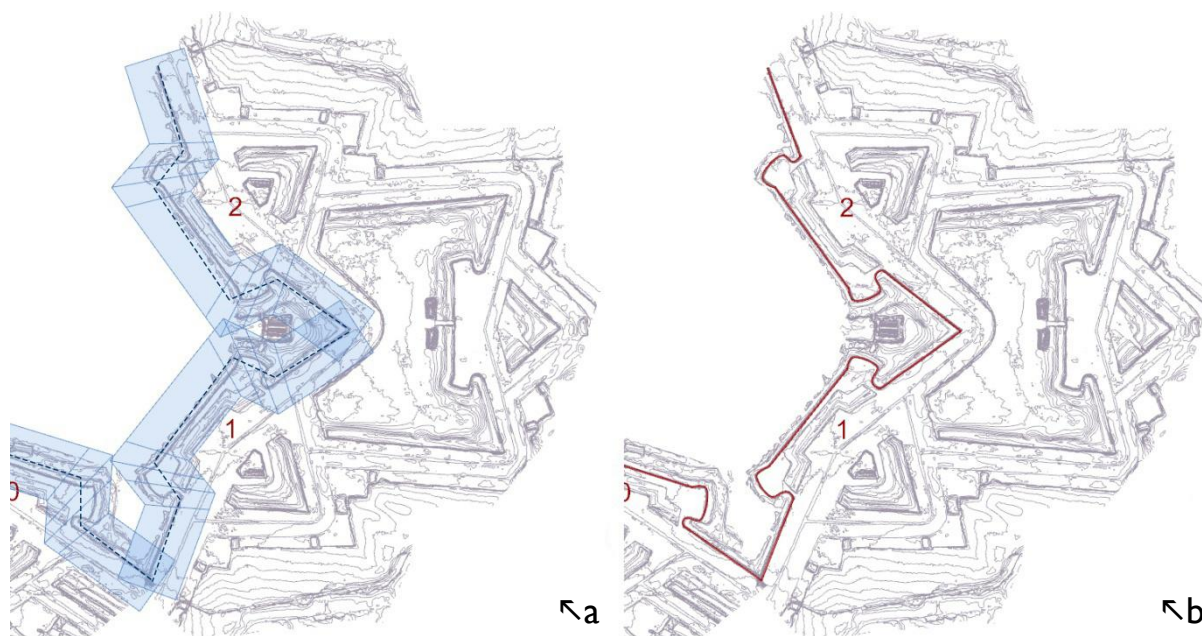


Figure 113. L'opération B. Définition d'une surface englobant la trajectoire du front permet de créer des surfaces englobant les segments formant les trajectoires des fronts (a). De ce lot restreint de segments, l'opération 1. Création de la trajectoire des ouvrages permet d'identifier et de reconstruire les trajectoires des ouvrages à l'image du front (b).

Il faut noter que la reconstruction de la trajectoire théorique du front est particulière. Elle se distingue de celles des autres ouvrages, car elle fait appel à un paramètre qui ne peut être défini que manuellement, lors de l'opération A. Ce paramètre est une géométrie de référence qui permet la construction de la trajectoire théorique du front. Or, pour les autres ouvrages comme la demi-lune, la tenaille, l'ouvrage à corne ou le chemin couvert dont la construction nécessite la trajectoire d'un précédent ouvrage pour être réalisée⁹⁷, on peut utiliser comme géométrie de référence les trajectoires extraites au fur et à mesure d'un processus itératif.

⁹⁷ cf. Partie B, chapitre IV.4.c.a, page 122

C'est pourquoi des rangs (r) ont été définis pour chaque ouvrage selon les géométries de référence dont il a besoin lors de sa construction. Lorsque l'ensemble des trajectoires des fronts (rang $r = 0$) a été extrait, la variable r est incrémentée de 1. En conséquence de quoi, les trajectoires théoriques de rang $r = 1$ vont être sélectionnées pour l'opération **B'**. **Définition d'une surface englobant la trajectoire de l'ouvrage de rang r recherchée.** Cette opération est similaire à l'opération B en cela qu'elle génère une surface à partir du tracé théorique de l'ouvrage étudié. Cependant, pour les ouvrages de rang supérieur à zéro, le paramètre de géométrie de référence est, comme nous l'avons précisé ci-dessus, une trajectoire de référence précédemment extraite (Figure 114).

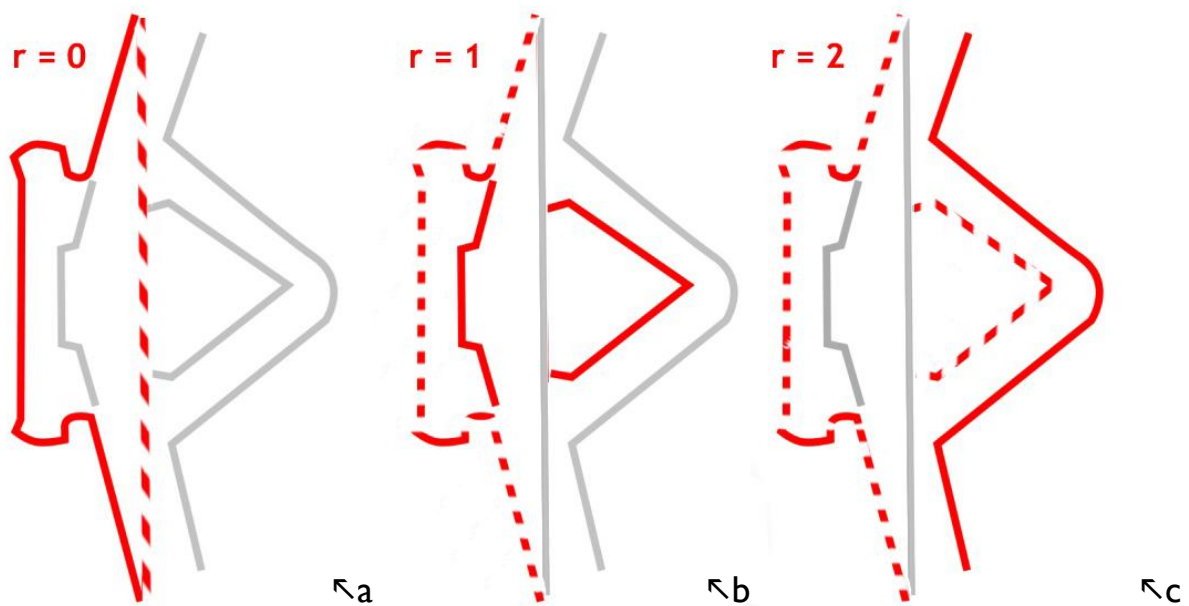


Figure 114. Paramètres pour chacune des trajectoires d'ouvrages selon le rang de l'ouvrage étudié. Le front (a, continu rouge), ouvrage de rang 0 ne s'appuie que sur le tracé du côté extérieur (a, en pointillé rouge) pour être construit. La tenaille et la demi-lune (b, continu rouge), ouvrages de rang 1, nécessitent le front (b, en pointillé rouge) pour être tracés tandis que le chemin couvert (c, continu rouge), ouvrage de rang 2, a besoin des trajectoires du front et de la demi-lune (c, en pointillé rouge) pour être construit.

La surface de l'ouvrage de rang $r=1$ est ensuite utilisée dans l'opération d'intersection avec le lot de segments produits par l'opération A pour isoler un lot restreint de segments parmi lesquels se trouve la trajectoire réelle de l'ouvrage de rang $r=1$. Ces segments sont ensuite l'un des deux paramètres de l'opération 1. **Création de la trajectoire des ouvrages** (le second paramètre étant la trajectoire théorique de l'ouvrage de rang $r=1$). Au terme de l'opération, la trajectoire de l'ouvrage de rang $r=1$ est extraite. Le processus se répète alors jusqu'à ce que le dernier rang défini soit atteint et que la condition $r > 3$ soit satisfaite. À ce moment, toutes les trajectoires d'ouvrages de chacun des différents fronts ont été extraites.

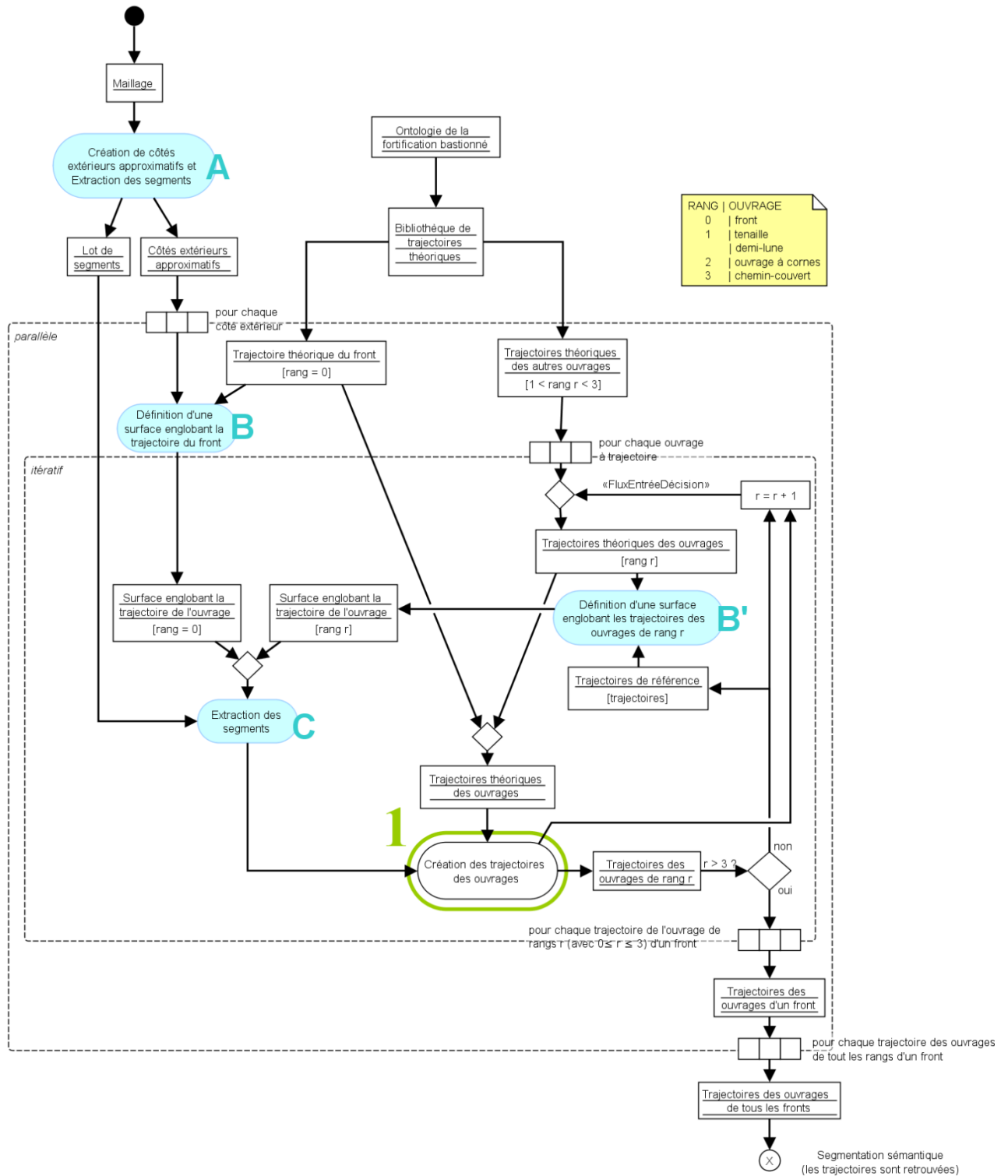


Diagramme 1. Diagramme d'activité UML représentant les opérations principales nécessaires à la segmentation sémantique et à la reconstruction des trajectoires des différents ouvrages de fortifications bastionnées. L'opération 1. Création des trajectoires des ouvrages est détaillée dans le Diagramme 2, page 182..

Les parties suivantes présentent les différents algorithmes implémentés dans les opérations A (V.4.b.a), B (V.4.b.b) et C (0) avant que nous ne développons l'opération 1 à partir de la partie V.4.b.e.

V.4.b.a. Opération A. Création de côtés extérieurs approximatifs

Nous allons maintenant développer l'algorithme implémenté dans l'opération A. **Création de côtés extérieurs approximatifs.** Pour chaque maillage, des courbes vont être extraites par l'intersection des maillages avec des séries de plans horizontaux. Les lignes polygonales produites sont ensuite projetées sur un plan unique. Dès lors, on dispose de l'équivalent d'une représentation 2D des fortifications sous forme de courbes de niveau (Figure 115). Un composant Grasshopper permet ensuite de simplifier les lignes polygonales (*Reduce [RedLine]*) en supprimant les points non essentiels. Le nombre de points baisse ainsi de plus de 80% dans le cas du maillage de Toul. Les segments sont ensuite extraits de chacune des lignes polygonales. Plusieurs des opérations qui viennent d'être énoncées consistent en des simplifications de la géométrie. Elles sont en effet essentielles pour maintenir des temps de calcul raisonnables sans pour autant influencer la qualité des résultats.

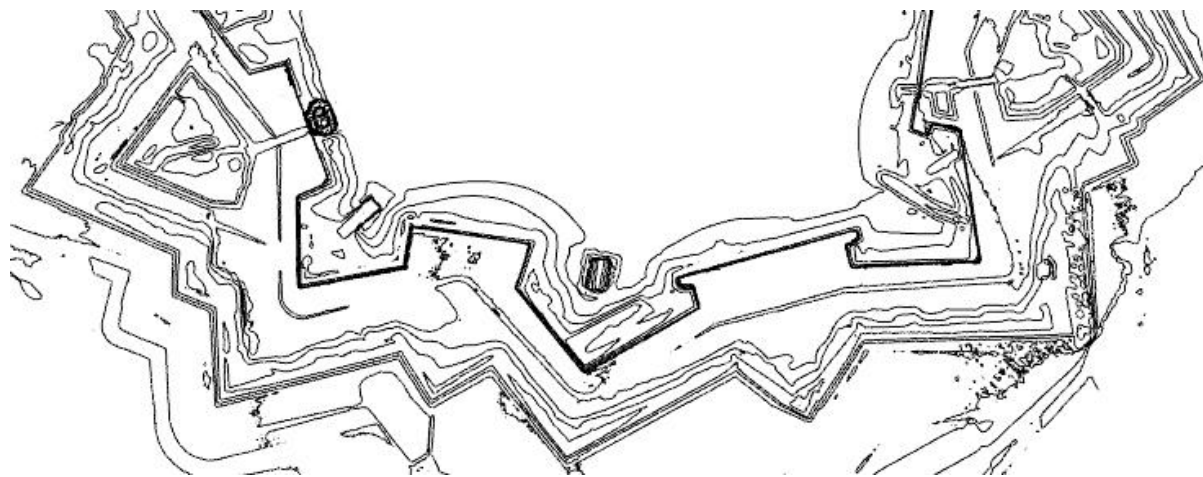


Figure 115. Courbes de niveau des fortifications bastionnées du plan-relief de Marsal à partir du maillage issu du relevé laser

À ce stade, on ne dispose que d'un lot unique de segments qui va nous servir à placer manuellement et approximativement les extrémités des trajectoires des fronts. Ainsi, pour un front unique, seuls deux points sont placés, tandis que pour une série de n fronts continus (polygone ouvert), $n+1$ points sont placés. Lorsqu'il s'agit d'une enceinte (polygone fermé) composée de n fronts, $n+1$ points sont également positionnés, car le premier sommet est renseigné deux fois (une condition de distance entre sommets permet de moyenniser deux points trop proches pour obtenir un sommet unique). Ces points deviennent ensuite les sommets d'une nouvelle ligne polygonale dont chacun des segments est un des côtés extérieurs approximatifs des fronts.

L'extraction de ces segments et la création des côtés extérieurs sont la seule opération nécessitant une intervention manuelle dans tout le processus de segmentation et constituent également l'un des paramètres d'entrée de l'opération décrite par l'algorithme B. **Définition d'une surface englobant la trajectoire du front.**

V.4.b.b. Opérations B et B'. Définition d'une surface englobant la trajectoire de l'ouvrage

Ces opérations réutilisent le composant de trajectoire d'ouvrage théorique présenté dans la partie V.2.b. Alors que nous étions obligés d'utiliser une instance pour chaque trajectoire recherchée lors de la création manuelle des trajectoires théoriques, la segmentation sémantique est opérée simultanément pour l'ensemble des côtés de la fortification, quel que soit leur nombre.

À partir du ou des segments formant les côtés extérieurs des fronts (ou des trajectoires extraites pour les ouvrages de rang > 1), la définition d'une surface englobant la trajectoire de l'ouvrage peut être menée parallèlement, c'est-à-dire pour chacun des côtés de la fortification simultanément. L'opération procède tout d'abord en la création d'une trajectoire théorique des ouvrages dont on va automatiquement obtenir une surface par le tracé de deux parallèles (*offset*) de part et d'autre de la trajectoire théorique. Les deux nouvelles trajectoires sont ensuite utilisées pour créer la surface englobante (Figure 116).

Algorithme A : Définition d'une surface englobant la trajectoire de l'ouvrage

Début

Variables d'entrée :

$L \leftarrow$ le lot de segments

$T \leftarrow$ chacune des trajectoires théoriques d'ouvrage

$d_1 \leftarrow$ tolérance 1

$d_2 \leftarrow$ tolérance 2

Instructions :

Pour chaque T

. Tracer les parallèles T_1 et T_2 à T à une distance d_1 et $-d_1$ respectivement

. Prolonger T_1 et T_2 à chaque extrémité d'une distance de d_2

FinPour

Variables de sortie :

$S \leftarrow$ la surface *loftée* à partir de T_1 et T_2 englobant T

Fin

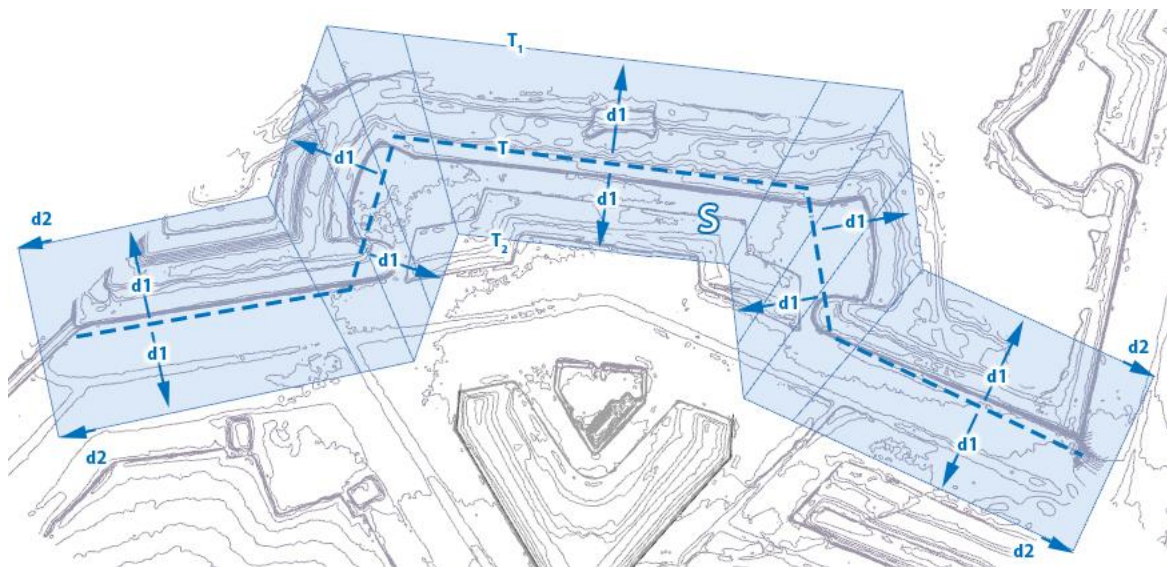


Figure 116. Définition d'une surface englobant (en bleu) la trajectoire réelle d'un front à partir de la trajectoire théorique du même ouvrage (en pointillés).

Demi-lune et tenaille sont deux ouvrages de même rang, c'est-à-dire que leurs tracés reposent sur un même tracé précédemment construit : la trajectoire du front. Ainsi, à partir de la trajectoire de référence, le processus d'extraction est réalisé simultanément pour les deux tracés recherchés. Des trajectoires théoriques de demi-lune et de tenaille issues de la bibliothèque d'objets paramétriques sont créées (Figure 117, en pointillé) grâce à la trajectoire réelle du front. De ces tracés théoriques, des surfaces englobantes sont alors générées pour permettre l'extraction de segments décrite dans la partie suivante.

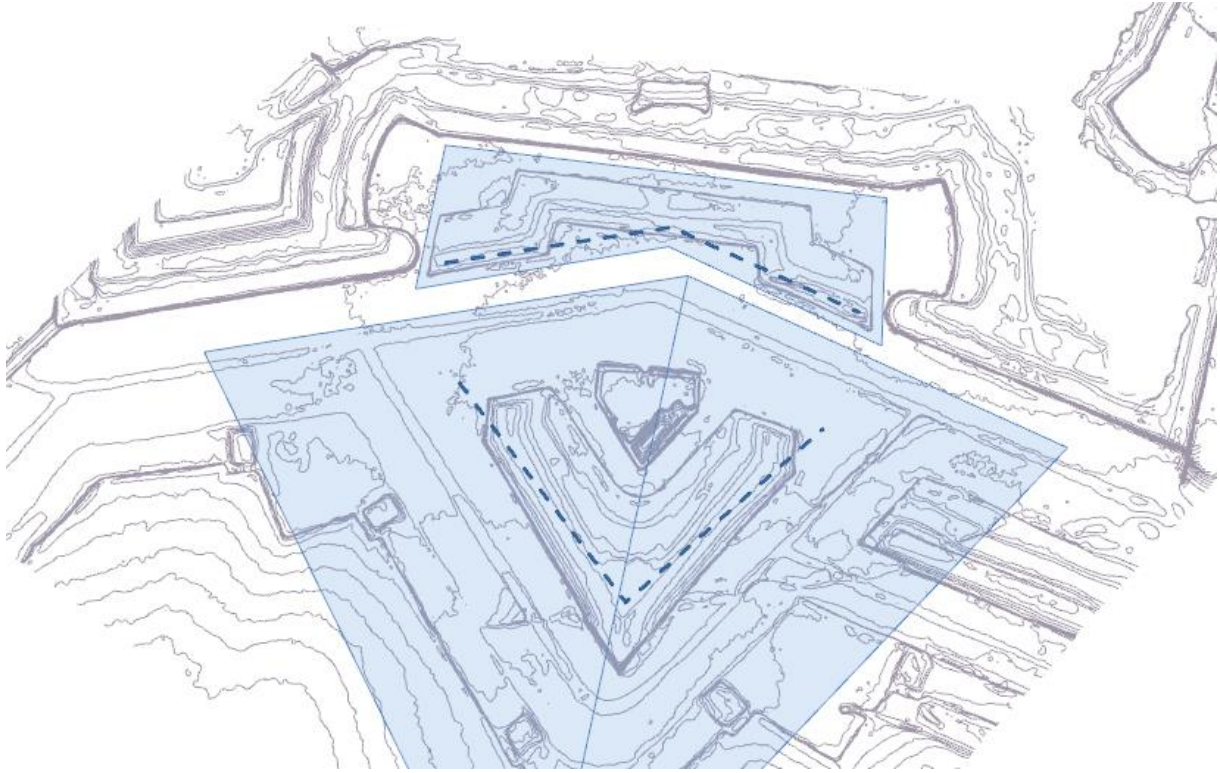


Figure 117. Les surfaces englobant (en bleu) les trajectoires réelles de la tenaille et de la demi-lune sont réalisées à partir des trajectoires théoriques (en pointillés) implémentées dans la bibliothèque d'objets paramétriques.

V.4.b.c. Opération C. Extraction d'un lot de segments appartenant à la surface englobant la trajectoire

L'opération permettant d'extraire un lot de segments appartenant à la surface englobant la trajectoire de l'ouvrage s'appuie sur la surface précédemment créée pour chacun des ouvrages recherchés. L'appartenance des segments à la surface permet de restreindre le lot de segments pour les opérations suivantes.

Algorithme B : Regroupement d'un lot de segments appartenant à la surface englobant la trajectoire

Début

Variables d'entrée:

$Z \leftarrow$ la surface englobant la trajectoire de l'ouvrage

$S \leftarrow$ les segments du lot initial

Instructions :

Pour chaque S

Si $S \in Z$ alors

. Ajouter S à L_F

Sinon Supprimer S

FinSi

FinPour

Variables de sortie :

L_F Le lot final de segments

Fin

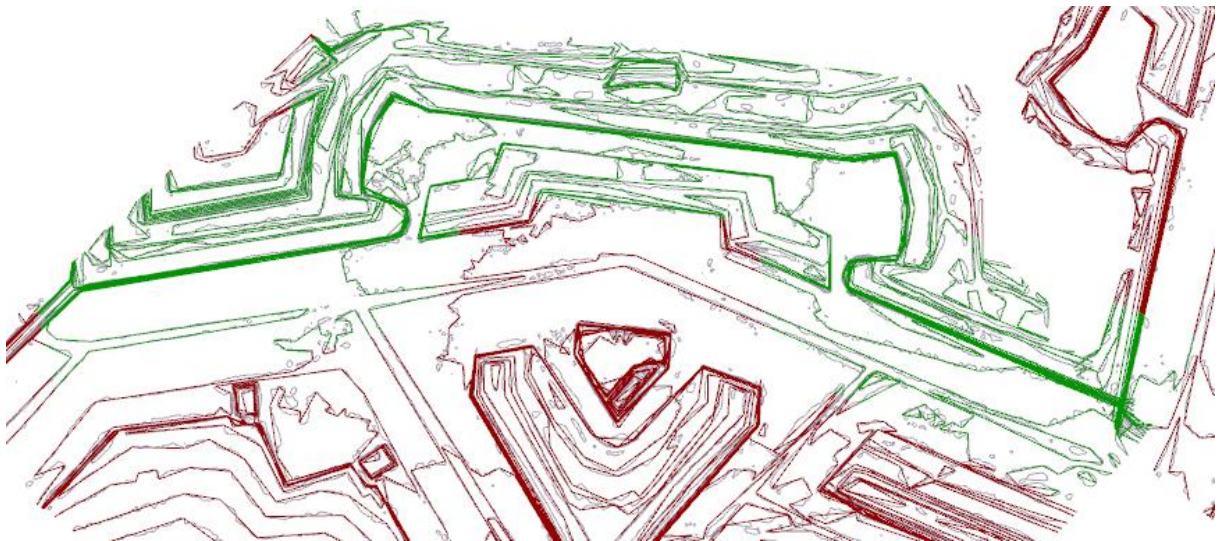


Figure 118. Regroupement d'un lot de segments (en vert) appartenant à la surface englobant la trajectoire du front parmi le lot initial de segments (en rouge).

V.4.b.d. Opération 1. Création des trajectoires des ouvrages

Jusqu'à maintenant, seuls les segments issus des courbes de niveau et appartenant à la surface englobant chacune des trajectoires ont été identifiés et extraits (résultat de l'opération C, Diagramme 2). Il s'agit dès lors d'extraire de ce nouveau lot, les segments appartenant aux différentes lignes des trajectoires (face, courtine et flanc). Cette opération est effectuée de manière séquentielle, ligne après ligne. Les entrées du processus de création des trajectoires d'un ouvrage de rang r (Diagramme 2, cadre 1) ont pour entrée le lot de segments issus du maillage, mais également des éléments de références. Ce sont les trajectoires théoriques des ouvrages de rang r ainsi que les lignes de trajectoire qui ont pu être précédemment extraites. Ainsi, lorsque l'opération 2 est menée pour la création de la face réelle, seule la trajectoire théorique de l'ouvrage est utilisée comme référence. Quand il s'agit de la ligne suivante, c'est-à-dire la courtine, la face qui vient d'être extraite est utilisée avec la trajectoire théorique pour extraire la courtine. Le flanc, dernière ligne à être recherchée, utilise faces et courtine réelle en plus de la trajectoire théorique.

Les premières lignes à extraire du lot de segments indifférenciés sont les faces. Lorsqu'au terme de l'opération 2. **Création d'un segment unique à partir de segments indifférenciés** les faces sont reconstruites, on soustrait les segments indifférenciés aboutissant à cette ligne (« Segments de la ligne » dans le Diagramme 2) du lot initial (« Segments indifférenciés »). Une différence vide implique l'absence de face, donc l'inexistence d'ouvrage de rang r ⁹⁸. Dans ce cas, l'opération 1 s'arrête et le rang est incrémenté de 1 pour poursuivre l'opération d'extraction avec des trajectoires d'ouvrage de rangs supérieurs à r . Cependant, si la différence est non nulle, les segments indifférenciés identifiés sont utilisés pour extraire les autres lignes formant les trajectoires (courtine et flanc) par la même opération, à savoir l'opération 2. **Création d'un segment unique à partir de segments indifférenciés**.

⁹⁸ Rappelons que la face est la seule ligne présente dans chaque ouvrage à trajectoire. Pour les différentes combinaisons de ligne possibles, se référer au chapitre IV.4.c.a, et notamment à la Figure 76, page 128.

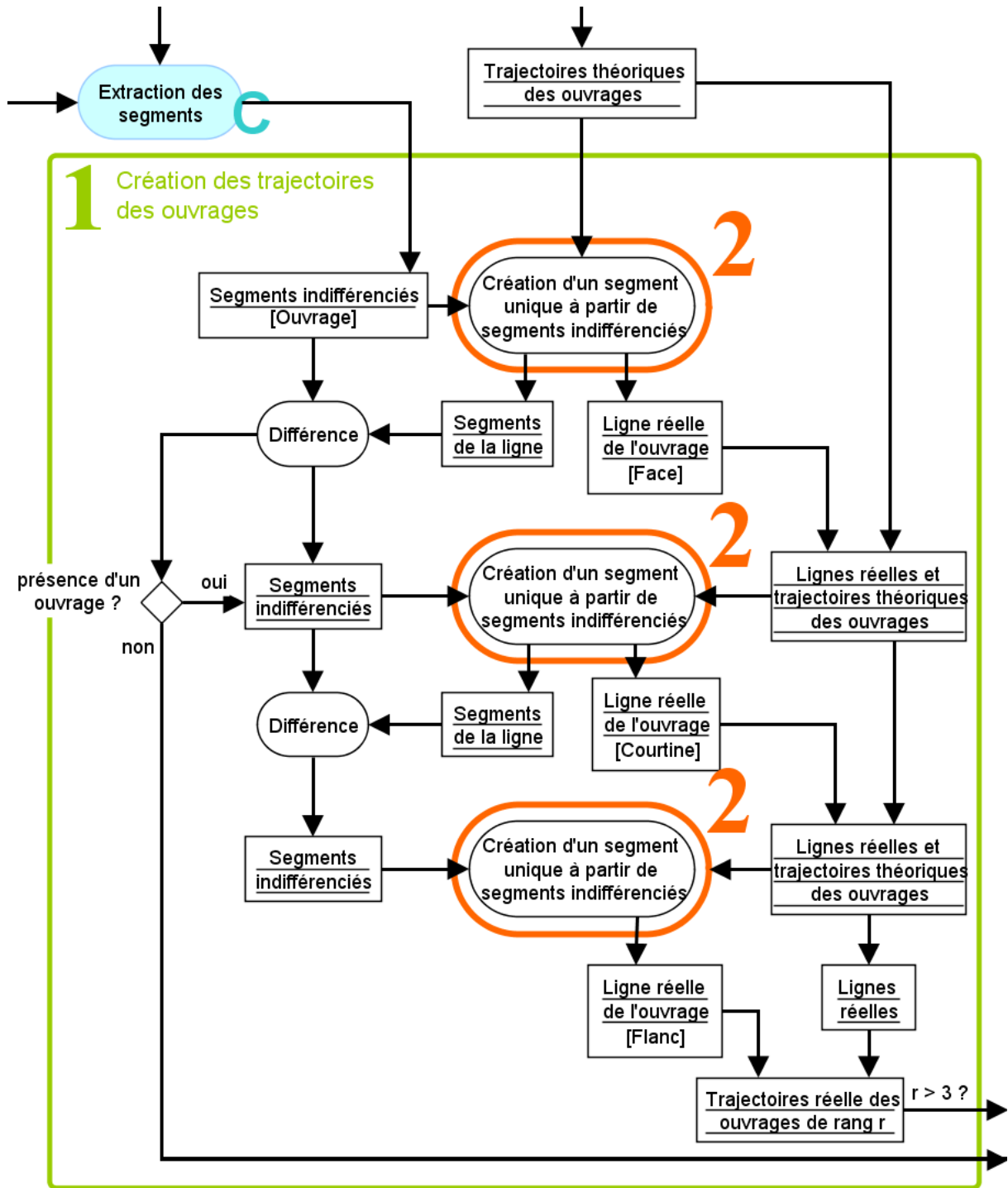


Diagramme 2. Détail de l'opération de création des trajectoires des ouvrages (1). L'opération de création d'un segment unique à partir de segments indifférenciés (2) est détaillée dans le Diagramme 3, page 183.

V.4.b.e. Opération 2. Création d'un segment unique à partir de segments indifférenciés

La création d'un segment unique à partir des segments indifférenciés est une opération répétée jusqu'à trois fois, afin d'extraire successivement les trois types de lignes formant les trajectoires des ouvrages de fortification. Cette opération, détaillée dans le diagramme 3 ci dessous nécessite, on l'a vu, des éléments de références (lignes réelles et trajectoires théoriques). Les segments indifférenciés, résultant de l'intersection du lot de segments initial (produit de l'opération A, Diagramme 1) avec la surface englobant le ou les ouvrages de rang r, sont également utilisés lors de l'opération 2.

La définition d'une surface englobant la ligne à extraire (D, Diagramme 3) permet de restreindre le lot de segments sur lequel travailler. Il est tout d'abord nécessaire de disposer de géométries de référence qui peuvent être les trajectoires théoriques ou des lignes précédemment extraites pour créer cette surface. L'intersection de cette surface avec le lot initial de segments (produit de l'opération A, Diagramme 1) se déroule au cours de l'opération d'extraction des lignes (E, Diagramme 3). Ce nouveau lot restreint de segments est ensuite soumis à deux opérations (F et G, Diagramme 3) s'appuyant uniquement sur la connaissance théorique en fortification bastionnée. La définition d'une plage de valeurs pour la longueur (F) de chaque type de ligne (face, courtine ou flanc) nous permet de restreindre à nouveau les segments dont la longueur est proche de celles des lignes recherchées. La définition d'une variable de position (G) permet ensuite de ne retenir que les segments situés à proximité immédiate de la ligne réelle. Au terme de ces opérations de sélection, on dispose d'un lot réduit de segments que l'opération H permet de fusionner en un unique segment, et ce, même en présence d'aberration. Ce nouveau segment est l'une des lignes de l'ouvrage

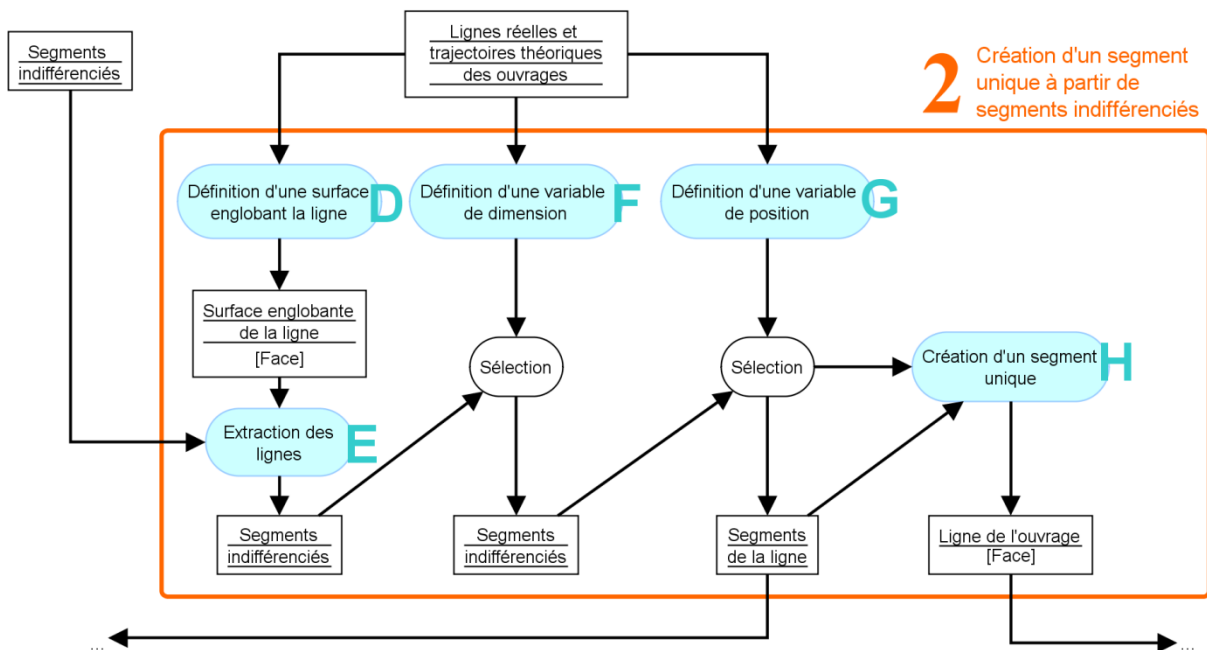


Diagramme 3. Détail du processus de création d'un segment unique à partir de segments indifférenciés (2). Les différentes opérations sont détaillées dans les parties suivantes : C en partie V.4.b.e, D en partie V.4.b.g, E en partie 0, F en partie V.4.b.i et G en partie V.4.b.j.

V.4.b.f. Opération D. Définition d'une surface englobant la ligne

La définition d'une surface englobant la ligne utilise la trajectoire théorique de l'ouvrage et plus particulièrement la partie de la trajectoire correspondant à la ligne que l'on cherche à extraire. La ligne théorique nous permet de déduire une surface englobant un lot de segments dans lequel doit être extraite la ligne réelle. L'opération est proche de celle menée à l'échelle de la trajectoire complète puisque l'on trace des parallèles de part et d'autre de la ligne recherchée à une distance propre au type de ligne recherchée pour un ouvrage donné (les distances de ces parallèles diffèrent d'un type de ligne à l'autre, mais aussi d'un type ouvrage à un autre). Ces parallèles sont ensuite prolongées à chacune de leurs extrémités selon une distance qui varie selon le type de ligne et le type d'ouvrage.

Algorithme D : Définition d'une surface englobant la ligne (cas des faces d'un front)

Début

Variables d'entrée :

$L \leftarrow$ l'ensemble des faces F de la trajectoire théorique

$d_1 \leftarrow$ tolérance 1

$d_2 \leftarrow$ tolérance 2

Instructions :

Pour chaque F de L

. Tracer les parallèles F_1 et F_2 à F à une distance d_1 et $-d_1$ respectivement

. Prolonger F_1 et F_2 à chaque extrémité d'une distance de d_2

FinPour

Variables de sortie :

$S \leftarrow$ les surfaces englobant F

Fin

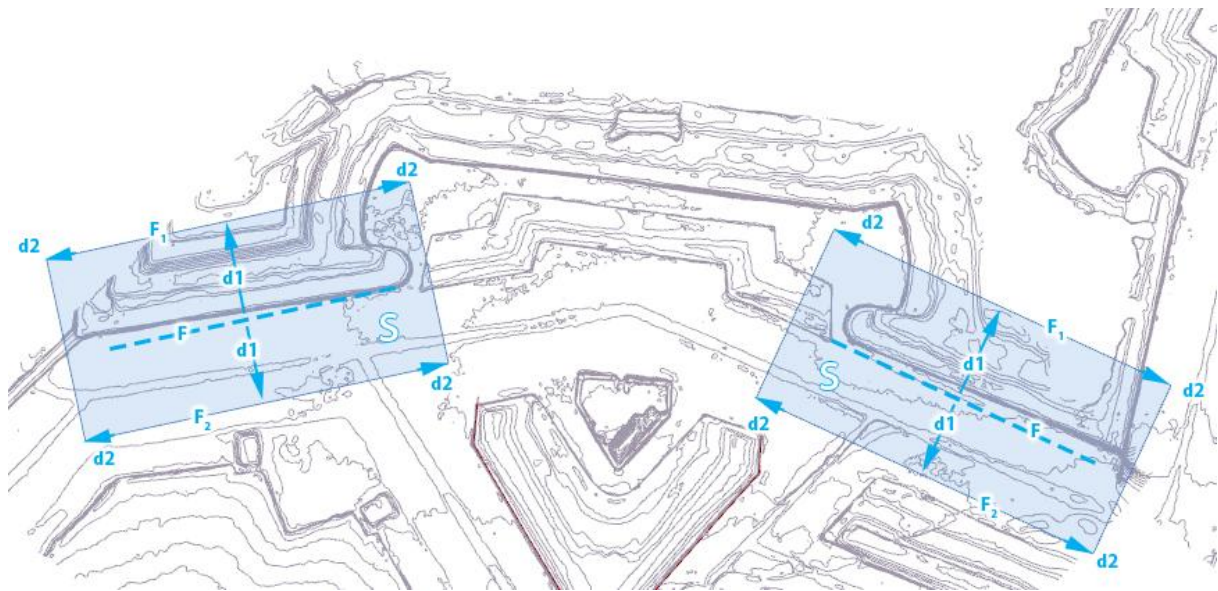


Figure 119. Définition d'une surface englobant la ligne de type Face (en bleu).

V.4.b.g. Opération E. Extraction d'un lot de segments appartenant à la surface englobant les segments

L'extraction du lot de segments appartenant à la surface englobante est une opération d'intersection, identique à l'opération C, présentée page 180. L'opération E a pour résultat un lot de segments (Figure 120, en vert)

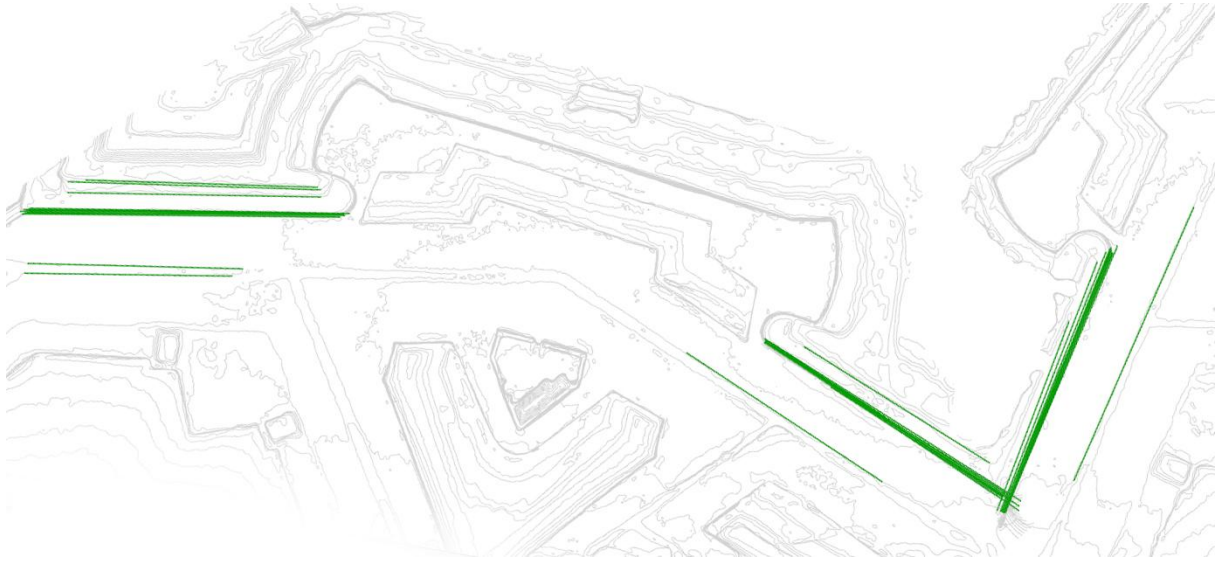


Figure 120. : Segments extraits de l'intersection de la surface et des segments du lot initial.

V.4.b.h. Opération F. Définition d'une variable de dimension et sélection des segments

La définition d'une variable de dimension permet de restreindre une fois de plus le nombre de segments du lot initial. À partir des règles de construction, il est possible d'éliminer un maximum de données aberrantes, c'est-à-dire les segments trop courts ou trop longs pour être une face, une courtine ou un flanc selon la ligne que l'on recherche. En reprenant l'exemple de la face d'une trajectoire de front, on définit deux seuils (un maximum et un minimum de longueur) :

Algorithme F : Définition d'une variable de dimension et sélection des segments

Début

Variables d'entrée:

- $L_i \leftarrow$ le lot initial de segments
- $T_{MAX} \leftarrow$ la variation maximum de longueur
- $T_{MIN} \leftarrow$ la variation minimum de longueur

Instructions :

- . Retrouver dans L_i , le segment de plus grande longueur L_{MAX} et de plus petite longueur L_{MIN}
- . Calculer $2/6$ de L_{MAX} et L_{MIN}
- . Seuil max $S_{MAX} = L_{MAX} - T_{MAX} \times L_{MAX}$
- . Seuil min $S_{MIN} = L_{MIN} - T_{MIN} \times L_{MIN}$

Pour chaque segment S de L_i

Si $S \in L$ **alors**

- . Ajouter S à L_f

FinSi

FinPour

Variables de sortie:

- L_f contient le lot final de segments

Fin



Figure 121. Définition d'une variable de dimension et sélection des segments (en vert) à partir du lot précédent. Les segments écartés au terme de l'opération figurent en rouge.

V.4.b.i. Opération G. Définition d'une variable de position et intersection

La définition d'une variable de position est à nouveau une opération qui permet de restreindre le nombre de segments du lot initial. À partir de lignes réelles déjà extraites des données brutes, on cherche à identifier automatiquement les segments apparentés à une autre ligne de la trajectoire (la face nous permet de reconstruire la courtine qui permet de reconstruire le flanc). Cependant, dans le cas du front, en l'absence de lignes réelles déjà extraites sur lesquelles s'appuyer pour identifier la face, nous utilisons les sommets des côtés extérieurs qui ont été placés manuellement lors de l'Opération A. Création de côtés extérieurs approximatifs, décrite page 177. À une certaine distance de ces points, une droite perpendiculaire est tracée et les segments du lot initial qu'elle intersecte sont extraits pour être utilisés dans la dernière opération.

Algorithme G : Définition d'une variable de position (cas d'une face d'un front)

Début

Variables d'entrée:

$L_i \leftarrow$ le lot initial de segments S

$F \leftarrow$ la face théorique

Instructions :

. Placer le point P à une distance d de l'extrémité de F

. Tracer la perpendiculaire T à F

Pour chaque segment S de L_i

Si $S \in L$ **alors**

. Ajouter S à L_f

FinSi

FinPour

Variables de sortie :

L_f contient le lot final de segments

Fin

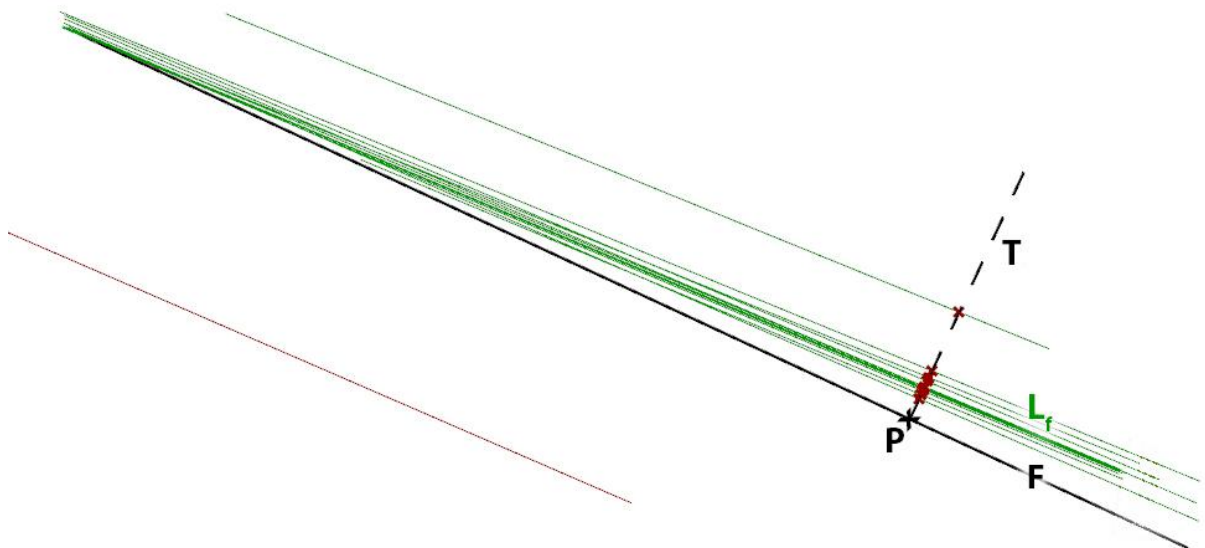


Figure 122. Définition d'une variable de position (pointillé) pour l'intersection du lot de segments à retenir (vert) parmi le lot initial de segment (rouge) dans le cas d'une face.

V.4.b.j. Opération H. Création d'un segment unique

Cette opération a pour entrée le lot de segments obtenu dans l'opération précédente. Proche d'opérations déjà présentes dans Grasshopper comme 'fit curve' ou 'fit line' qui permettent l'ajustement d'une courbe dont on contrôle le degré sur une courbe préexistante ou d'une courbe sur un ensemble de points, l'opération que nous mettons en œuvre est différente, car elle a pour objectif l'ajustement d'une ligne unique sur un ensemble de lignes existantes.

Pour chaque segment du lot initial produit lors de l'opération G, on calcule la distance entre son milieu et le milieu P des autres segments du lot unique (Figure 123, en pointillé). Une distance moyenne pour chacun de ses segments est ensuite calculée. La valeur médiane de la liste des distances moyennes permet enfin d'extraire les segments dont la distance moyenne est inférieure ou égale à la médiane. Les points formant leurs extrémités sont ensuite moyennés pour former les deux extrémités *ptdébut* et *ptfin* d'un nouveau segment unique (Figure 123, en vert).

Algorithme H : Création d'un segment unique à partir du lot de segments (cas d'une face d'un front)

Début

Variables d'entrée:

$L_1 \leftarrow$ le lot initial de segments S

$P \leftarrow$ le milieu de S

Instructions :

Pour chaque segment S_1 de L_1

. $P_1 \leftarrow$ le milieu de S_1

Pour chaque segment S_2 (\neq de S_1) de L_1

. $P_2 \leftarrow$ le milieu de S_2

. Calculer les distances d_i entre le point P_1 et P_2

. Calculer la moyenne M_i des d_i de P_2

FinSi

. $M_i =$ la moyenne des d_i

. $M_e =$ la médiane des M_i

Pour chaque segment S_1 de L_1

Si $M_i \geq M_e$ **alors**

. Supprimer S de L_1

FinPour

FinPour

. *ptDébut* = Moyenne des points des extrémités 1 des segments de

L_1

. *ptFin* = Moyenne des points des extrémités 2 des segments de L_1

Variable de sortie :

$F \leftarrow$ le segment unique [*ptDébut* *ptFin*]

Fin

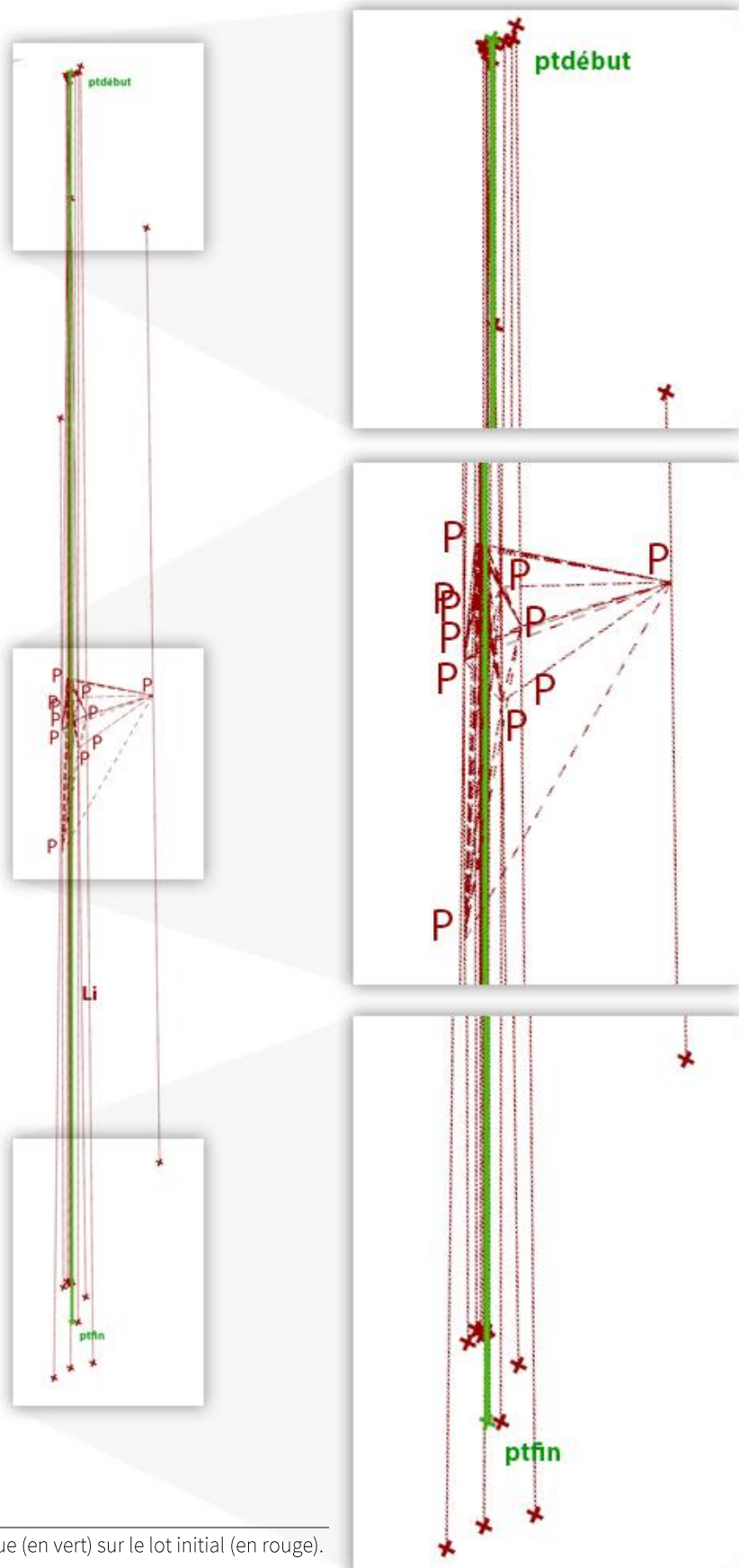


Figure 123. Ajustement d'une ligne unique (en vert) sur le lot initial (en rouge).

Une ultime opération a été implémentée pour la segmentation sémantique des trajectoires des ouvrages. Elle n'est appliquée qu'en situation où des trajectoires sont continues d'un ouvrage à l'autre, comme cela peut être le cas pour les fronts et les chemins couverts notamment. Ainsi, les fronts d'une enceinte ont une trajectoire continue d'un côté à l'autre de l'enceinte. Il est donc nécessaire de joindre les extrémités des trajectoires pour obtenir un tracé continu.

Après avoir déterminé la distance entre les extrémités voisines de deux trajectoires d'un ouvrage de même type, et si cette distance n'excède pas une tolérance, on procède automatiquement à la création d'un nouveau point (Figure 124, le point E) dont les coordonnées sont égales à la moyenne des extrémités des faces [AB] et [CD] situées du côté de la capitale du bastion (les points B et D). Cet unique point, relié aux extrémités des faces côté place, permet de reconstruire une trajectoire continue d'un front à l'autre.

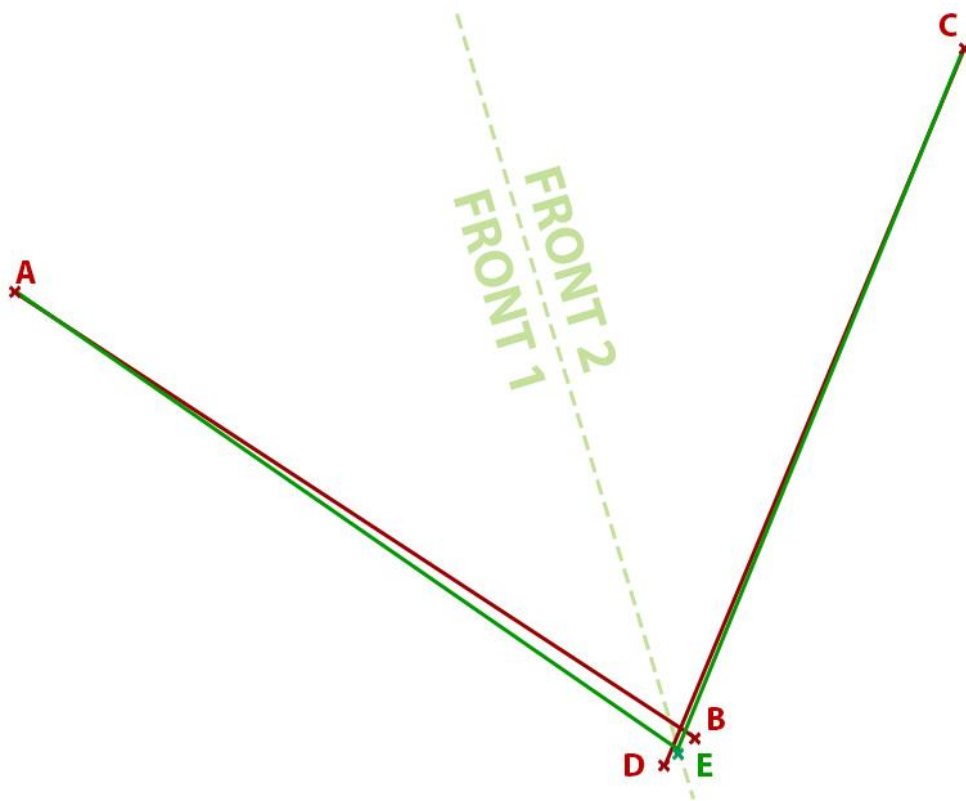


Figure 124. Raccordement des faces de fronts mitoyens. Les faces originales (en rouge) sont raccordées au niveau de la capitale pour créer une trajectoire continue de front en front (en vert).

V.5. Résultats de l'extraction des trajectoires

Au terme du processus de segmentation sémantique, nous avons réussi à extraire et à reconstruire 21 trajectoires d'ouvrage depuis les données relevées sur les plans-reliefs, parmi lesquels douze fronts, six demi-lunes et trois tenailles. Les deux exemples présentés ci-après (Figure 126 et Figure 125) sont représentatifs des résultats des 21 trajectoires sur lesquelles a été menée notre expérimentation. Même s'il s'agit uniquement d'une appréciation visuelle des résultats, on constate de manière manifeste la supériorité des trajectoires extraites automatiquement du maillage sur les trajectoires théoriques non ajustées en termes de précision sur les données brutes.

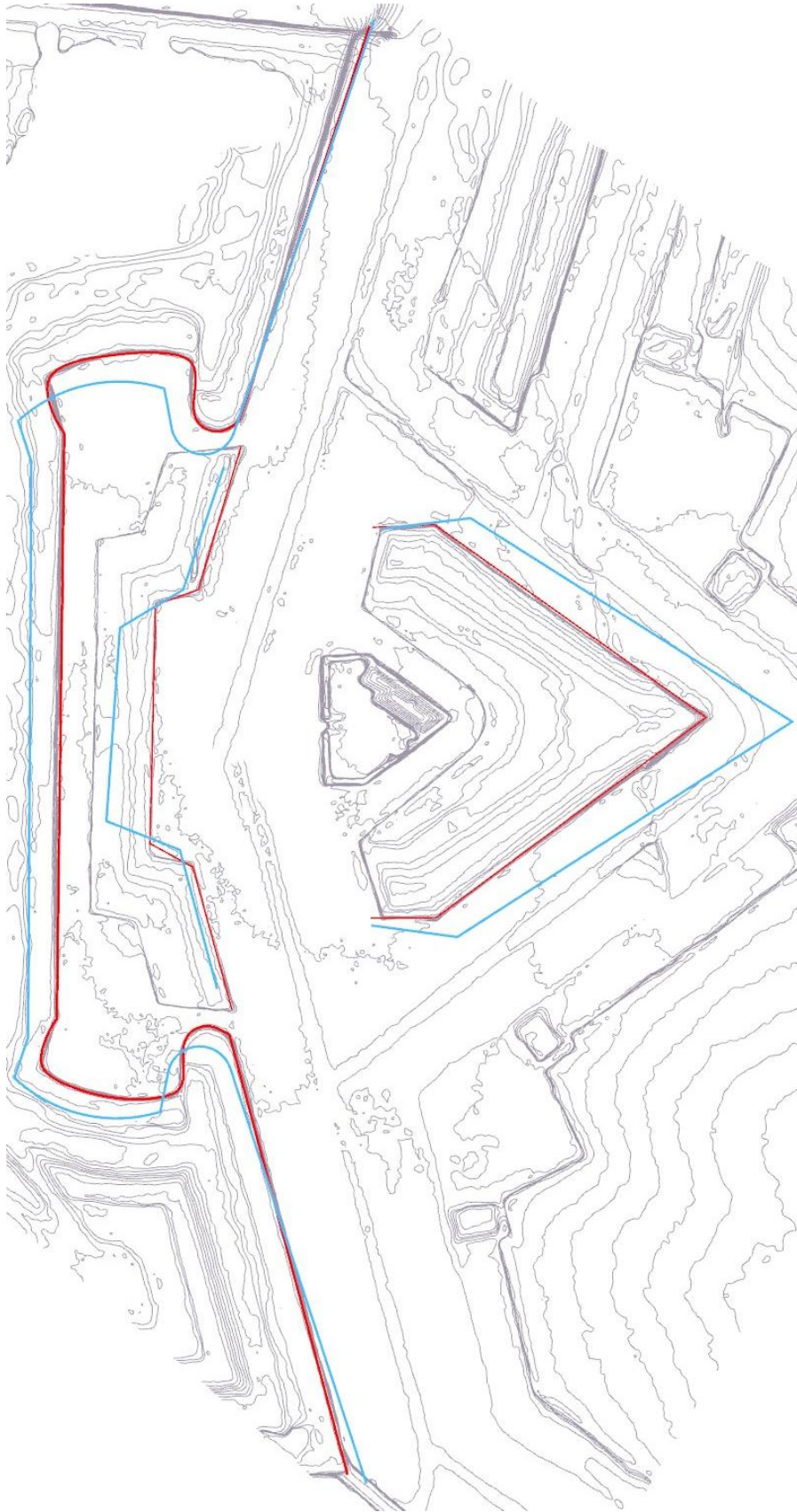


Figure 125. Comparaison des trajectoires obtenues par le composant trajectoire théorique du front, de la tenaille et de la demi-lune (en bleu) et par segmentation automatique des mêmes trajectoires (en rouge). Aucun tracé n'a été ajusté manuellement. Front 0 du plan-relief de Strasbourg.

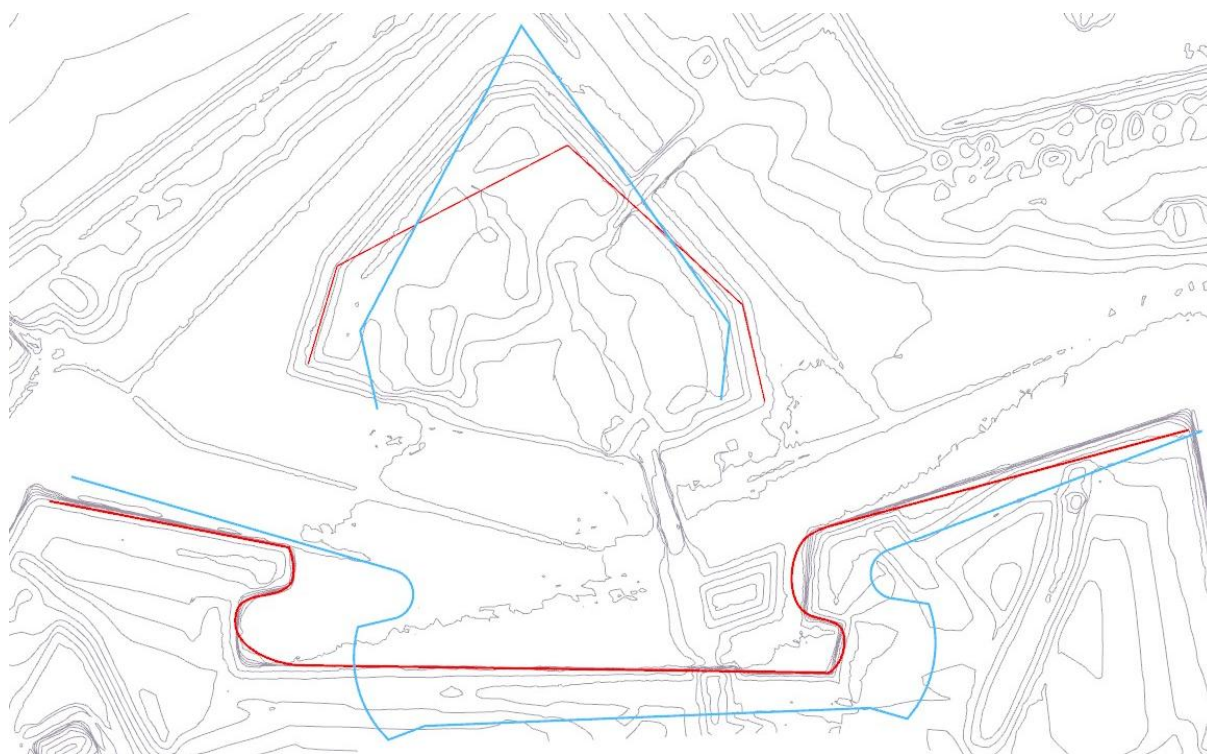


Figure 126. Comparaison des trajectoires obtenues par le composant trajectoire théorique du front et de la demi-lune (en bleu) et par segmentation automatique des mêmes trajectoires (en rouge). Aucun tracé n'a été ajusté manuellement. Front 4 du plan-relief de Marsal.

Pour évaluer la précision de la segmentation et de la reconstruction automatique des trajectoires des ouvrages de fortification bastionnée, nous utilisons directement une méthode simple et couramment utilisée en particulier dans la communauté des SIG, qui permet de déterminer la précision de tracés linéaires à partir d'une zone tampon (Goodchild, Hunter, 1997). La quantité de tracés évaluée à l'intérieur de cette zone permet de calculer le pourcentage de précision de l'extraction des trajectoires (Figure 127). La zone tampon définie est de 3,3 mm de part et d'autre du tracé ajusté que l'on considère comme le plus fidèle à la réalité. Cette valeur correspond à une toise à échelle réelle, c'est-à-dire un peu moins de deux mètres.

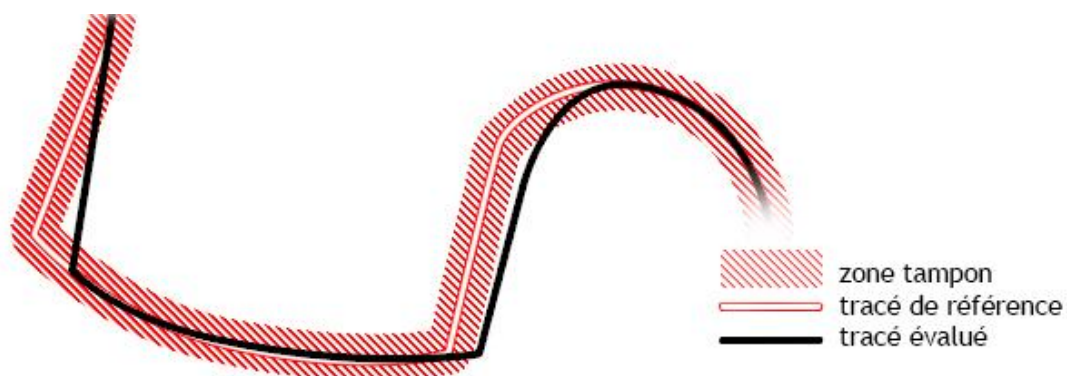


Figure 127. Zone tampon autour d'un tracé référence pour déterminer la précision d'un nouveau tracé au niveau d'un orillon.

Comme on peut le constater sur les figures Figure 129, Figure 130, Figure 131 et Figure 132, une zone tampon de 3,3 mm de part et d'autre du tracé référence demande une grande précision. Le Tableau 6 rend compte des résultats de l'extraction de trajectoires selon cette précision. Les trajectoires de front présentent d'excellents résultats, supérieurs à 90%. La difficulté majeure pour les fronts se situe en présence d'orillon, notamment parce que les segments les constituants sont de faibles longueurs. Au moment de la numérisation, le relevé de ces objets présente soit de trop grandes irrégularités, soit n'est pas possible du niveau de détail des éléments concernés.

Les trajectoires que nous retrouvons pour les ouvrages extérieurs (demi-lune et tenaille) sont également précises si l'on fait abstraction de la tenaille de Toul (Figure 128, a) et de la demi-lune 0 de Marsal (Figure 128, b). La première, bien que située à la place allouée aux tenailles, n'en partage que peu de caractéristique géométrique. En conséquence de quoi, les algorithmes de segmentation présentés précédemment sont incapables d'extraire la moindre trajectoire. La trajectoire de la demi-lune 0 de Marsal ne peut-être extraite correctement, car les algorithmes implémentés pour les demi-lunes ne permettent pas d'extraire des trajectoires pour lesquelles l'angle formé par les faces est tronqué, comme c'est le cas ici.

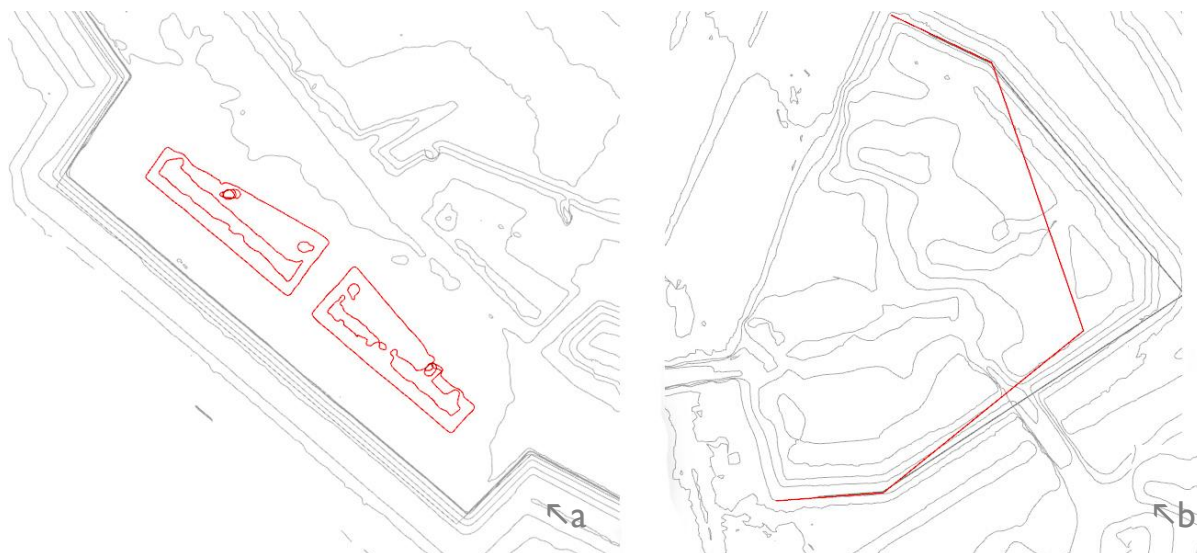


Figure 128. Tenaille de Toul (a, courbes rouges) et demi-lune de Marsal (b, trajectoire segmentée rouge).

Une deuxième évaluation a eu lieu avec une zone tampon de 1 mm de part et d'autre du tracé référence (Tableau 7). Les pourcentages sont à la baisse comme nous pouvions l'imaginer, mais ils demeurent ici satisfaisants eu égard à l'échelle des maquettes étudiées. À l'origine appliquée au domaine de la cartographie, l'exactitude dimensionnelle nous permet de connaître la précision à attendre d'une représentation (Bertin, 1999). Pour fixer la valeur de notre zone tampon, nous utilisons une norme fixée par l'IGN pour évaluer de manière objective notre approche. Ainsi, la zone tampon est réduite à la limite de la précision graphique que l'on peut attendre d'un dessinateur, c'est-à-dire 0,1 mm de part et d'autre du tracé référence (Tableau 8).

L'évolution des résultats selon ces trois valeurs de zone tampon confirme l'efficacité de la démarche que nous proposons. Même si à 0,1 mm, la précision moyenne se situe autour de 50%, il est nécessaire de rappeler que même si les résultats chutent de moitié, la zone tampon elle, est trente fois plus petite. De plus, l'étape de segmentation et de reconstruction que nous venons de présenter s'inscrit dans

un processus plus vaste d'automatisation des ajustements d'objets paramétriques. Les trajectoires reconstruites peuvent donc servir à une étape d'ajustements manuels ponctuels et limités.

	Marsal		Toul			Strasbourg		
	Front	Demi-lune	Front	Demi-lune	Tenaille	Front	Demi-lune	Tenaille
Front 0	93,91%	44,47%	89,14%	-	0,00%	100,00%	97,66%	99,46%
Front 1	63,72%	-	100,00%	99,15%	-	93,87% ⁹⁹	90,47%	100,00%
Front 2	97,07%	-	-	-	-	97,02%	90,09%	93,33%
Front 3	94,83%	-	-	-	-	-	-	-
Front 4	95,64%	100,00%	-	-	-	-	-	-
Front 5	92,04%	-	-	-	-	-	-	-
Front 6	95,40%	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne	90,37%	72,24%	94,57%	99,15%	0,00%	96,96%	92,74%	97,60%
Moyenne/ maillage	86,34%		72,07%			95,77%		

Tableau 6. Pourcentage de correspondance entre le tracé obtenu par segmentation et le tracé une fois ajusté avec une zone tampon de 3,3 mm sur la maquette.

	Marsal		Toul			Strasbourg		
	Front	Demi-lune	Front	Demi-lune	Tenaille	Front	Demi-lune	Tenaille
Front 0	69,15%	31,8%	72,48%	-	0,00%	91,03%	97,66%	93,30%
Front 1	56,36%	-	100,00%	99,15%	-	77,83%	65,66%	96,62%
Front 2	83,19%	-	-	-	-	82,13%	89,97%	73,54%
Front 3	86,12%	-	-	-	-	-	-	-
Front 4	76,08%	100,00%	-	-	-	-	-	-
Front 5	65,60%	-	-	-	-	-	-	-
Front 6	87,84%	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne	74,91%	65,90%	86,24%	99,15%	0,00%	83,66%	84,43%	87,82%
Moyenne/ maillage	72,90%		67,91%			85,30%		

Tableau 7. Pourcentage de correspondance entre le tracé obtenu par segmentation et le tracé une fois ajusté avec une zone tampon de 1 mm sur la maquette.

⁹⁹ Voir l'illustration de la trajectoire : Figure 129

	Marsal		Toul			Strasbourg		
	Front	Demi-lune	Front	Demi-lune	Tenaille	Front	Demi-lune	Tenaille
Front 0	44,57%	1,73%	66,05%	-	0,00%	70,19%	97,66%	43,66%
Front 1	53,37%	-	65,44%	18,41%	-	74,61%	17,90%	73,34%
Front 2	50,43%	-	-	-	-	71,59%	23,04%	62,89%
Front 3	60,15%	-	-	-	-	-	-	-
Front 4	59,90%	7,95%	-	-	-	-	-	-
Front 5	56,52%	-	-	-	-	-	-	-
Front 6	92,02%	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne	59,57%	4,84%	65,75%	18,41%	0,00%	73,10%	46,20%	59,96%
Moyenne/ maillage	47,40%		37,48%			59,43%		

Tableau 8. Pourcentage de correspondance entre le tracé obtenu par segmentation et le tracé une fois ajusté avec une zone tampon de 0,1 mm sur la maquette.



Figure 129. Trajectoire du front 1 de Strasbourg reconstruit après segmentation à une précision de 93,87% pour une zone tampon de 3,3 mm.



Figure 130. Trajectoire du front 2 de Marsal reconstruit après segmentation à une précision de 97,07% pour une zone tampon de 3,3 mm.

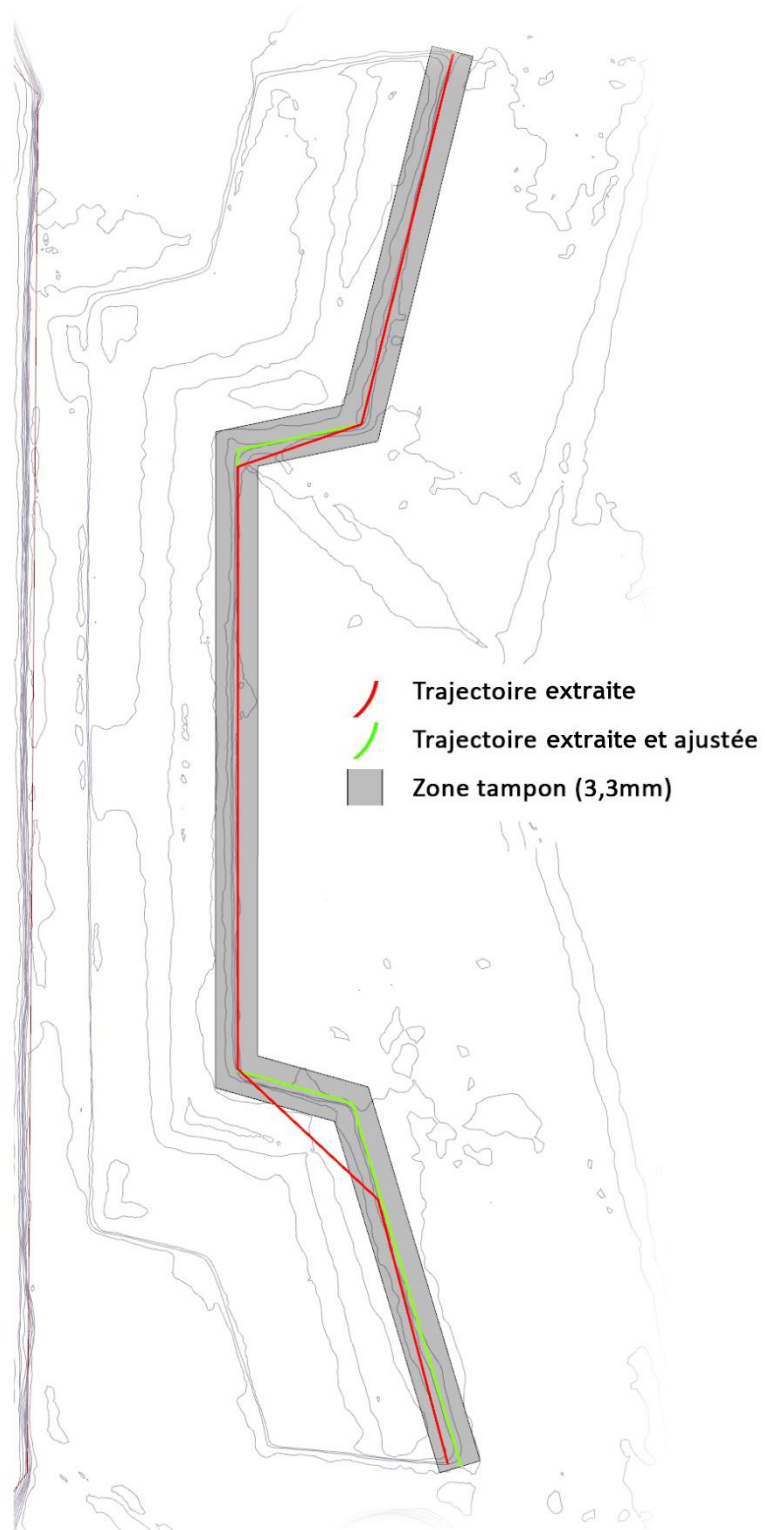


Figure 131. Trajectoire de la tenaille simple 2 de Strasbourg reconstruit après segmentation à une précision de 93,33 % pour une zone tampon de 3,3 mm.

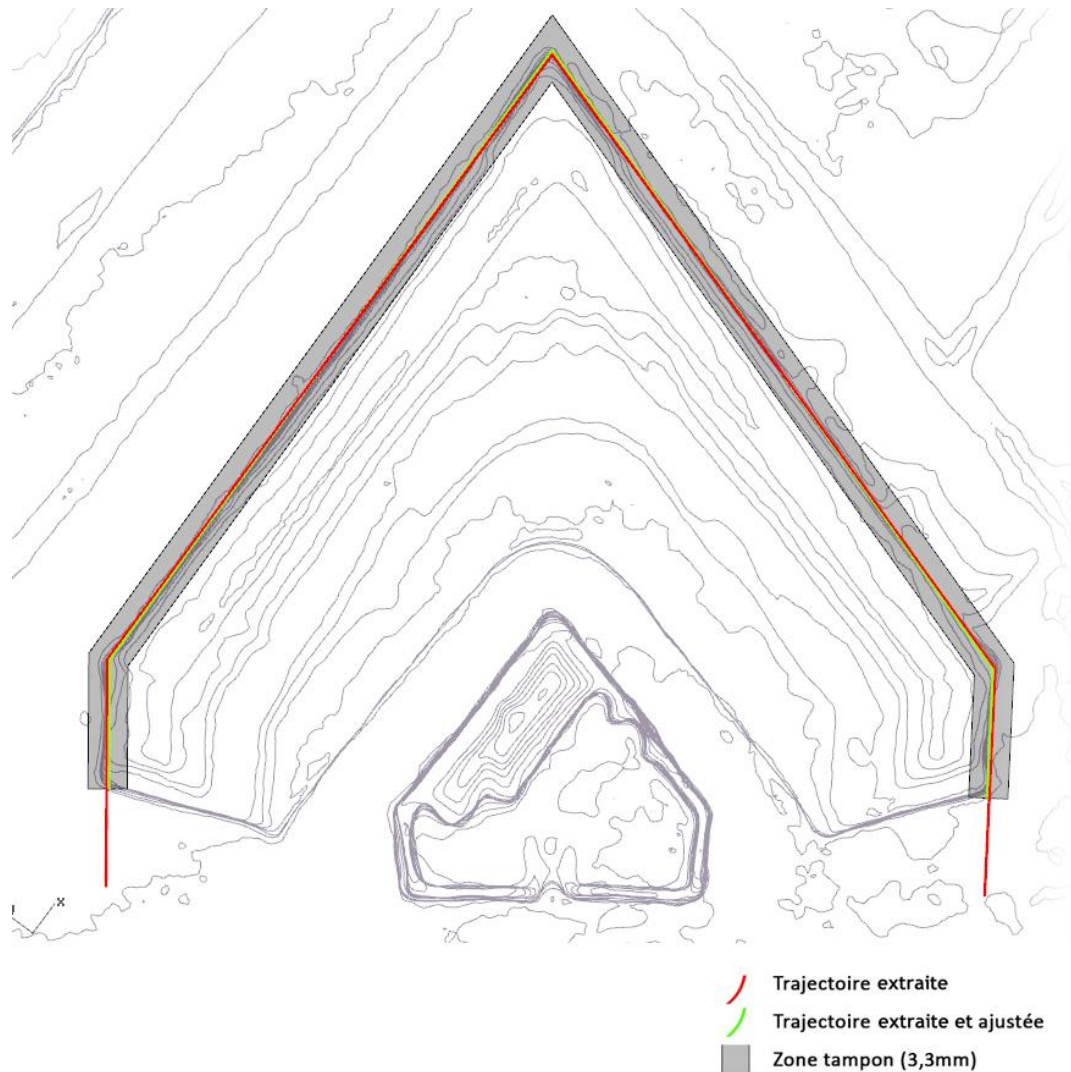


Figure 132. Trajectoire de la demi-lune à flanc 2 de Strasbourg reconstruit après segmentation à une précision de 90,09% pour une zone tampon de 3,3 mm.

V.6. Reconstruction des trajectoires et ajustements finaux

La partie V.2 a présenté la création des composants de trajectoire théorique. La partie V.3 a présenté les composants d'ajustement. Ces deux jeux de composants permettent à un utilisateur d'effectuer des ajustements manuels de trajectoires pour les différents ouvrages implémentés. Alors que jusqu'à maintenant, chaque composant d'ajustement d'ouvrage était associé à un objet « trajectoire théorique d'ouvrage », il est dorénavant possible de substituer à ce dernier une trajectoire segmentée, telle que nous les avons présentées dans la précédente partie.

Les illustrations Figure 133, Figure 134 et Figure 135 représentent les composants d'ajustement Grasshopper des différentes trajectoires que l'on a pu extraire automatiquement (enceinte et orillon, demi-lune et tenaille) et leurs paramètres d'ajustement. Parmi ceux-ci, on remarque notamment le paramètre de trajectoire pour lequel on utilise la trajectoire segmentée de l'ouvrage en lieu et place de la trajectoire théorique jusqu'alors utilisée. Les ajustements de cette trajectoire sont modestes et localisés au niveau des orillons présents sur les flancs.

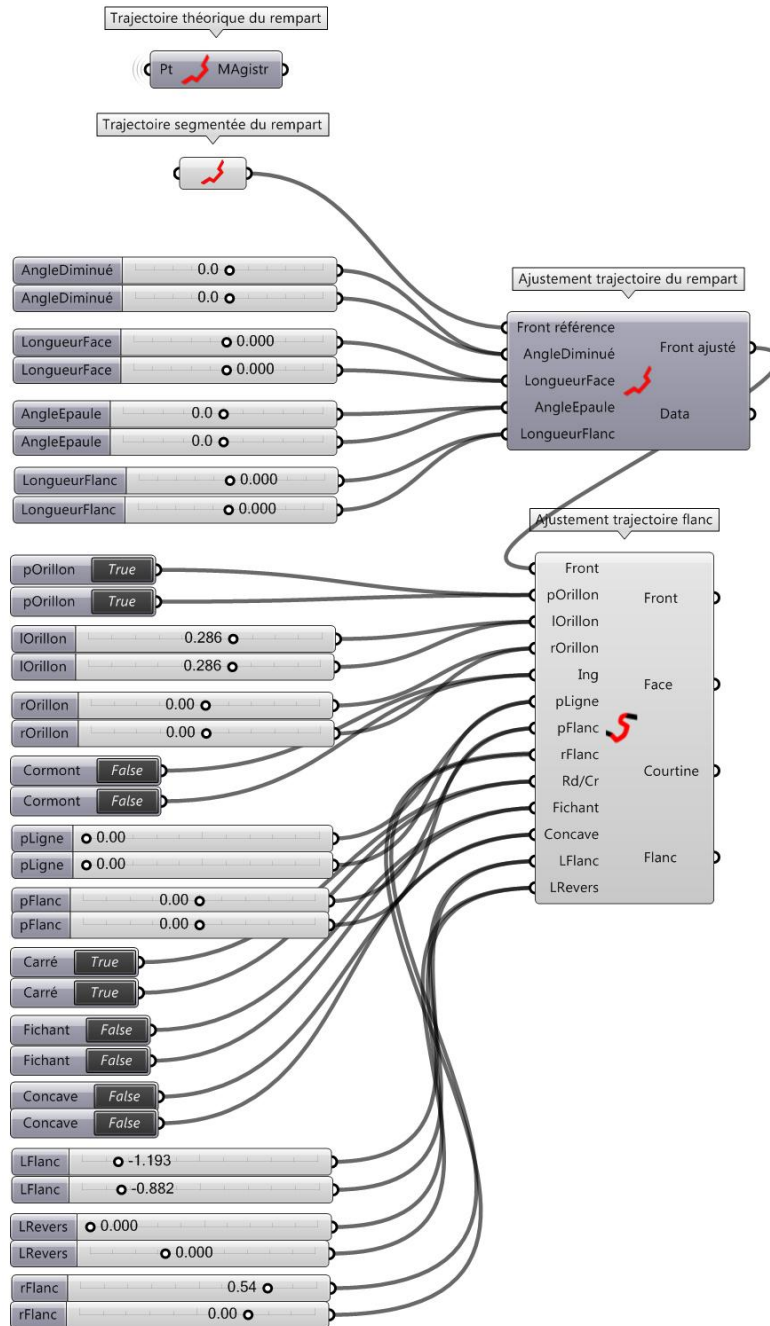


Figure 133. Composants d'ajustement de la trajectoire d'un front segmenté et de ses flancs à orillons.

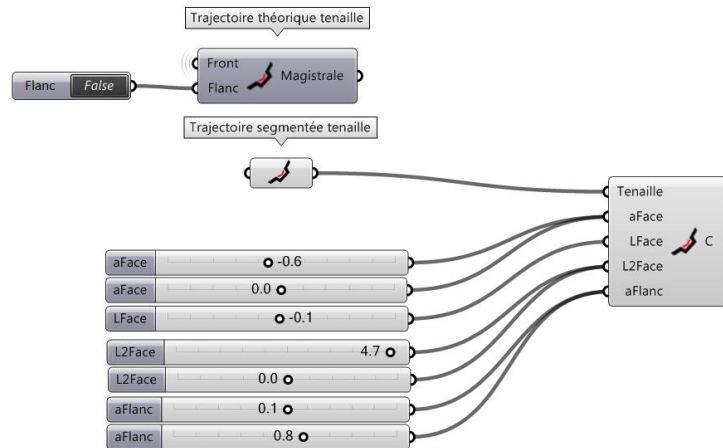


Figure 134. Composants nécessaires aux ajustements finaux de la trajectoire segmentée de la tenaille simple.

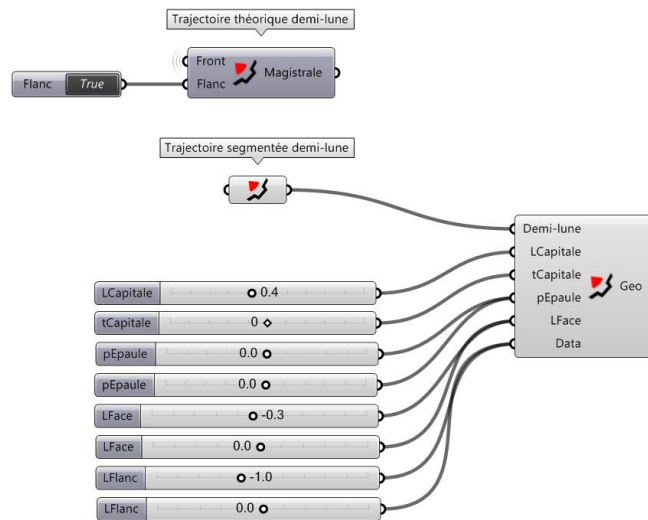


Figure 135. Composants nécessaires aux ajustements finaux de la trajectoire segmentée de la demi-lune à flanc.

V.7. Bilan et perspectives pour le prototype

Les résultats de l'extraction automatique des trajectoires selon la méthode KASToR permettent de valider notre approche basée sur les connaissances propres à la fortification bastionnée. Bien que limitées à quelques nuages de points maillés de fortifications bastionnées de trois plans-reliefs, les expérimentations ont produit d'excellents résultats, même sur des données tridimensionnelles d'origines différentes. D'une part, la validation des reconstructions automatiques repose sur une évaluation rigoureuse de la précision des différents tracés extraits des données relevées et d'autre part, les tracés peuvent encore être rendus plus précis par une intervention finale de l'utilisateur.

Néanmoins, de nombreuses perspectives s'ouvrent à nous pour améliorer et compléter la reconstruction des parties fortifiées des plans-reliefs. Elles concernent notamment les ouvrages à trajectoire (V.7.a) et leur modélisation en trois dimensions (V.7.b), mais aussi les autres ouvrages de fortification que nous avons identifiés (V.7.c). Enfin, l'utilisation de KASToR sur des relevés de plans-reliefs où les fortifications sont irrégulières est une autre perspective que nous abordons à travers une sélection de plans-reliefs des frontières de l'est (V.7.d).

V.7.a. Les ouvrages à trajectoire

Certaines trajectoires d'ouvrages n'ont pas pu être identifiées. La tenaille de Toul et l'une des demi-lunes de Marsal (Figure 128) n'ont pu être extraites des données relevées du fait de leur disparité avec les modèles théoriques des mêmes ouvrages. Dans le cas de Marsal, il reste possible d'affiner les algorithmes de segmentation pour être en mesure de reconstruire la trajectoire de l'ouvrage, car le modèle réel diffère peu du modèle théorique. Seule la présence d'un segment supplémentaire, formant un chanfrein au niveau de l'angle des deux faces, provoque l'échec de la reconstruction. La prise en compte de cette configuration peut être intégrée dans l'ontologie et dans les algorithmes de segmentation. Cependant, pour la tenaille de Toul, la morphologie de l'ouvrage ne correspond en rien au modèle théorique des différentes tenailles décrites dans le modèle de connaissances ou rencontrées dans les traités de fortification. Dans le cadre de notre projet, cet ouvrage doit être déclassé pour être intégré à une catégorie d'ouvrage autre que celle des tenailles. En l'absence de modèle théorique décrivant cet ouvrage, la reconstruction de la tenaille de Toul ne peut pas pour l'instant être automatisée.

Toutes les trajectoires des objets présents sur les différents relevés à notre disposition n'ont pas encore été implémentées à l'image des ouvrages à corne ou des chemins couverts. Ces trajectoires sont d'autant plus critiques qu'il s'agit de tracés reposant sur des trajectoires des fronts et des demi-lunes. La réussite de la segmentation des trajectoires des ouvrages à cornes ou des chemins couverts dépend donc en grande partie de la qualité des résultats de la segmentation des trajectoires des ouvrages de rangs inférieurs. Les résultats déjà obtenus montrent une baisse de qualité de la segmentation automatique des trajectoires des demi-lunes par rapport à celles des fronts. Cette tendance reste à confirmer sur les trajectoires d'ouvrages de rangs supérieurs telles que les ouvrages à corne et les chemins couverts.

V.7.b. Reconstruction du relief : le balayage des profils

Quelques expérimentations ont été menées pour la création des ouvrages en trois dimensions selon le processus de balayage dont nous avons établi qu'il était à la base de la modélisation géométrique des ouvrages du corps de place et des ouvrages extérieurs (Figure 136). Sur Grasshopper, les trajectoires théoriques ont été créées selon les principes de construction des tracés issus des traités de fortification. Ainsi, le groupe de composants « trajectoires » comprend entre autres la trajectoire des fronts et celles des autres ouvrages (demi-lune, tenaille, etc.). L'autre groupe de composants comprend les différents éléments pouvant constituer le profil du front (terre-plein, banquette, parapet, cordon, escarpe). La combinaison de ces deux groupes par l'intermédiaire d'un composant d'extrusion nous permet de modéliser la plupart des ouvrages de fortification bastionnée.

Il est à noter que les trajectoires ne sont pas uniquement composées de lignes polygonales, car on peut noter la présence d'arcs de cercle notamment pour le tracé des orillons. De plus, les trajectoires peuvent être fermées ou ouvertes et dans ce dernier cas, il est nécessaire de pouvoir contrôler l'orientation des profils extrêmes comme nous l'avons établi précédemment, au chapitre IV.4.c.a : La trajectoire. L'entrée gorge du composant accepte une ligne polygonale qui va déterminer le comportement de la géométrie créée. En l'absence de gorge, les profils situés aux extrémités sont positionnés sur des plans orthogonaux (Figure 136).

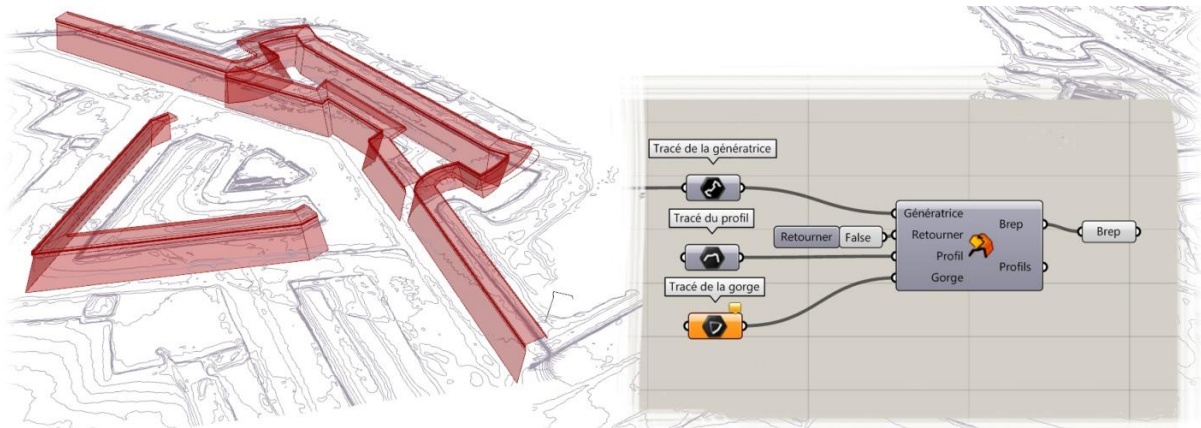


Figure 136. Composant de balayage avec ses paramètres : tracé de la trajectoire, tracé du profil et tracé de la gorge.

Les composants *'loft'* et *'sweep'* permettent de modéliser des surfaces à partir de profils ; *'sweep'* permettant même de contraindre le balayage le long d'une ou deux trajectoires, mais aucun d'eux ne peut satisfaire l'ensemble des contraintes que nous venons d'énoncer. En conséquence de quoi, l'implémentation d'un composant de balayage spécifique aux fortifications bastionnées est requise pour pouvoir permettre la modélisation en trois dimensions des ouvrages à trajectoire.

V.7.c. Les autres ouvrages de fortification

Outre les ouvrages à trajectoire, nous avons également identifié des ouvrages dont la modélisation géométrique repose sur des révolutions (guérite, dame, etc.) et d'autres, les édifices militaires, pour lesquels des règles de constructions propres à chaque ouvrage doivent être appliquée (corps de garde, caserne, etc.)¹⁰⁰. Dans les deux cas, la reconstruction automatique de ces ouvrages doit s'appuyer sur le résultat de la reconstruction des ouvrages à trajectoire. En effet, les ouvrages à révolution ou les édifices militaires sont généralement localisés à des endroits déterminés des fortifications d'une place forte. Modélisée dans l'ontologie, cette contrainte de localisation, associée aux tracés des ouvrages à trajectoire déjà extraits, nous permettrait d'identifier des lots de facettes du maillage provenant de l'acquisition et susceptibles de représenter de tels ouvrages.

Par exemple, les magasins à poudre sont situés dans les bastions, c'est-à-dire, dans l'ouvrage formé par les flancs et les faces de deux trajectoires consécutives de front. Dans les données relevées sur les plans-reliefs de Strasbourg (Figure 137, a) et de Marsal (Figure 137, b), ces édifices militaires se distinguent facilement par leur localisation.

V.7.d. Les autres plans-reliefs

KASToR repose sur une ontologie dans laquelle ont été modélisés les différents ouvrages de fortification bastionnée ainsi que les relations qu'ils entretiennent. À l'heure actuelle, le modèle de connaissance s'appuie essentiellement sur le premier système de Vauban dont les règles de construction et les principes permettent de décrire un grand nombre de places fortes, dont Strasbourg, Marsal et Toul pour lesquels nous disposons de relevés tridimensionnels partiels.

¹⁰⁰ cf. Partie B, chapitre IV.4.b, page 121

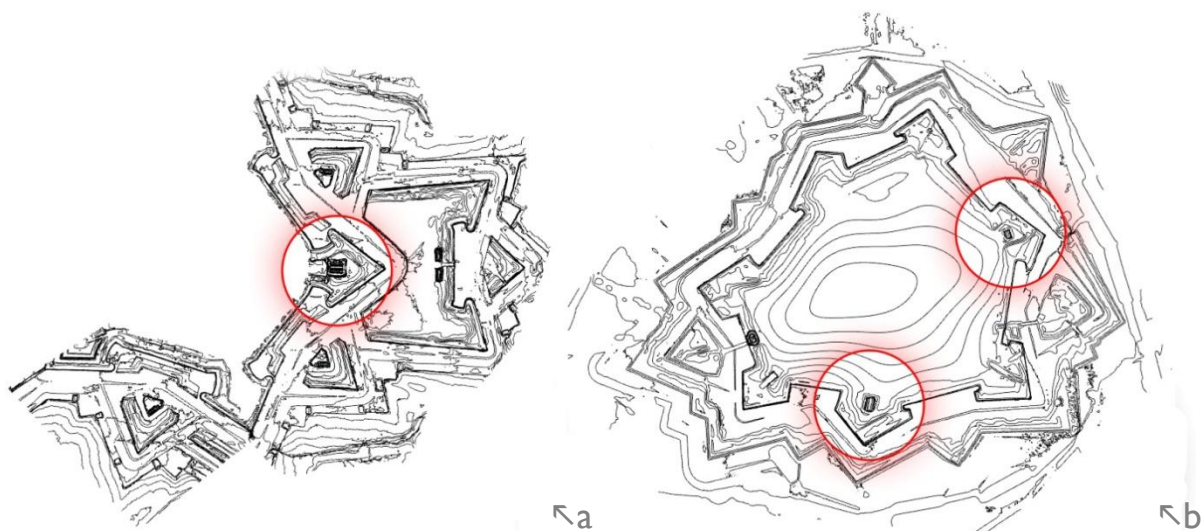


Figure 137. Les magasins à poudre (cercles rouges) dans les lots de segments obtenus à partir des maillages de Strasbourg (a) et de Marsal (b).

Cependant, pour les fortifications des plans-reliefs de Belfort¹⁰¹ ou de Neuf-Brisach¹⁰², il serait nécessaire de compléter l'ontologie et les algorithmes de segmentation qui en résultent avec les principes et les règles de construction du second et du troisième système de Vauban, pour lesquels l'ingénieur a créé des ouvrages spécifiques. Dans le cas de Verdun¹⁰³, de Metz¹⁰⁴ et Bitche¹⁰⁵, appliquer la méthode KASToR sur des relevés de ces plans-reliefs nécessiterait de prendre en compte les adaptations des fortifications à la topographie particulière de ces places fortes. Il reste difficile de présager de l'efficacité de notre méthode sur ces fortifications en l'absence de relevés tridimensionnels sur lesquels tester la rétroconception, mais dans le cas de Bitche, qui est construit sur un étroit éperon rocheux, notre approche pourrait être inexploitable tant la fortification diffère des modèles théoriques.

¹⁰¹ cf. Annexe 8)a) Le plan-relief de Belfort, page 246

¹⁰² cf. Annexe 8)f) Le plan-relief de Neuf-Brisach, page 251

¹⁰³ cf. Annexe 8)i) Le plan-relief de Verdun, page 254

¹⁰⁴ cf. Annexe 8)e) Les plans-reliefs de Metz, page 250

¹⁰⁵ cf. Annexe 8)b) Le plan-relief de Bitche, page 247

Conclusion

Le travail présenté dans cette thèse explore les questions de l'acquisition des données tridimensionnelles au regard des contraintes spécifiques du relevé architectural et de l'interprétation sémantique des données. Ces interrogations trouvent un écho tout particulier lorsqu'elles sont appliquées à la collection des plans-reliefs. Pour répondre aux enjeux patrimoniaux que sont la préservation et la diffusion d'un héritage méconnu, l'acquisition tridimensionnelle des plans-reliefs est une première étape vers la création d'archives numériques, mais aussi de modèles virtuels qui peuvent être diffusés à grandes échelles sur internet et valorisés par les technologies de l'information et de la communication. Dans nos conclusions, nous rappelons les enjeux en matière de relevé tridimensionnel, de restitution géométrique et de caractérisation sémantique des formes architecturales, avant de poursuivre avec notre proposition, la mise en place du prototype, son expérimentation et ses résultats, mais aussi les limites de notre approche ainsi que les perspectives pour les travaux futurs.

La problématique

Dans le domaine du patrimoine architectural, les maquettes sont des objets uniques qui concentrent et amplifient la plupart des enjeux connus en matière de numérisation. Ce sont tout d'abord des objets difficiles d'accès car encombrants et fragiles. Certaines maquettes sont ainsi exposées à l'abri dans des vitrines climatisées avec un éclairage contrôlé. Beaucoup sont rangées, démontées, dans des caisses situées soit dans les combles des Invalides, soit à l'extérieur du musée. C'est pourquoi toute opération de relevé tridimensionnel doit être effectuée sur un laps de temps réduit pour ne pas risquer d'endommager ce patrimoine classé. Alors que les techniques d'acquisition doivent ainsi pouvoir générer des données rapidement, il leur faut être également précises du fait de l'échelle et du niveau de détail des maquettes. Ce sont en effet des modèles réduits. L'échelle est ainsi un facteur qui pose de nombreux problèmes au moment d'acquisition tridimensionnelle, car, malgré les récents progrès dans le domaine des techniques de numérisation, aucune n'est encore capable d'effectuer efficacement des relevés d'objets à la fois de grandes surfaces avec un niveau de détail élevé.

Les nombreux projets de numérisation de maquettes sont riches d'enseignement. Pour quelques-uns, les projets n'ont pas vocation à restituer la maquette, mais la ville représentée ; pour les autres : les relevés tridimensionnels ne sont utilisés que pour assister l'homme dans une modélisation manuelle de la maquette. Mais ces projets ont tous en commun de témoigner de la difficulté d'acquérir des données tridimensionnelles à partir de maquette et d'en automatiser les traitements en vue de la création de modèles virtuels enrichis sémantiquement.

Rétroconception du patrimoine architectural

Notre proposition s'inscrit à la croisée de plusieurs domaines de recherche qui sont l'acquisition tridimensionnelle, la segmentation des données ainsi produite, la modélisation géométrique et l'enrichissement sémantique des objets architecturaux. À ces enjeux, nous proposons une approche fondée sur les connaissances architecturales : une rétroconception des données relevées lors de l'acquisition des fortifications des plans-reliefs. La méthode KASToR s'appuie sur l'étude de textes théoriques pour définir et organiser les principes et les règles de construction de la fortification bastionnée. Le modèle de connaissance résultant, une ontologie de la fortification souligne l'importance des tracés régulateurs dans la construction de nombreux ouvrages fortifiés. Ce tracé, une fois extrait des données obtenues par relevés lasers ou photogrammétriques, nous procure en réalité les différentes trajectoires d'opérations géométriques de balayage. Couplées à des profils, ces trajectoires permettent de reconstruire en trois dimensions des différents ouvrages de fortification bastionnée.

Grâce à ce principe et à l'étude des règles de construction définies dans les traités de fortification, nous pouvons implémenter une bibliothèque d'objets paramétriques composée des différentes trajectoires et profils théoriques nécessaires à la reconstruction géométrique des fortifications. Mises à l'épreuve sur différentes sources, dont des relevés tridimensionnels et les documents préparatoires des plans-reliefs étudiés, les trajectoires paramétriques doivent encore être ajustées aux trajectoires réelles. Conduite manuellement, cette phase d'ajustement peut s'avérer extrêmement fastidieuse, mais essentielle à la validation des modèles paramétrique de la bibliothèque en vue du bon déroulement de la dernière phase : la reconstruction automatique des trajectoires. Les modèles paramétriques sont également utilisés pour la segmentation sémantique des données relevées lors de l'acquisition. Car la segmentation a pour objectif d'identifier et de distinguer les données selon leur appartenance à des modèles prédéfinis (front, demi-lune, tenaille, etc.). Une fois ces données segmentées, des instances paramétrées de ces mêmes modèles leur sont ajustées automatiquement.

Bien que limitées à quelques nuages de points maillés de fronts bastionnés de trois plans-reliefs, les expérimentations ont produit d'excellents résultats, même sur des données d'origines variées. D'une part, la validation de nos reconstructions repose sur une évaluation rigoureuse de la précision des différents tracés extraits des données relevées et d'autre part les tracés peuvent encore être améliorés par une intervention finale de l'utilisateur.

Limites et perspectives de la recherche

Grâce à l'ontologie de la fortification bastionnée que nous avons définie, il a été possible d'analyser des relevés tridimensionnels et ainsi de permettre l'interprétation sémantique d'une partie des données relevées. Même si seuls les tracés en plan d'ouvrages de fortification ont pu être extraits, ces données architecturales constituent un socle sur lequel peut s'appuyer le reste du travail de reconstruction automatique des fortifications bastionnées. Ainsi, pour achever le processus de reconstruction géométrique des ouvrages à trajectoire, il est maintenant aisé d'extraire pour chacun des tracés retrouvés, le ou les profils associés, et ainsi les balayer le long d'une trajectoire pour modéliser en trois dimensions des ouvrages de fortification.

Outre la poursuite de la reconstruction des ouvrages à trajectoire avec l'extraction des profils pour le balayage, il est encore nécessaire de traiter les autres types d'ouvrages de fortification bastionnée tels que les ouvrages à révolution (guérite, dame, etc.), les édifices militaires (magasin à poudre, caserne, etc.) et les ouvrages échappant à toute classification (tenaille de Toul). Hormis ces derniers ouvrages, nous pouvons affirmer que des recherches pour la reconstruction automatique des ouvrages des deux premières catégories peuvent s'appuyer sur les objets dont nous avons présenté la rétroconception dans cette thèse. En étendant le modèle de connaissance de la fortification bastionnée aux ouvrages à révolution et aux édifices militaires, il est possible d'explicitier leurs relations avec les ouvrages à trajectoire déjà reconstruits et ainsi, de les identifier, de les extraire et de les reconstruire à leur tour.

Conséquence du problème d'accès aux plans-reliefs, une des limites majeures de ce projet est la quantité limitée de données brutes sur lesquelles nous avons pu tester notre approche. Cependant, avec la mise en place au sein du laboratoire d'un protocole d'acquisition pour le relevé photogrammétrique de plans-reliefs nous permettant de mener l'acquisition de manière rapide et efficace, mais aussi grâce aux contacts établis avec les différents acteurs intervenants dans des projets récents de numérisation de maquettes, il est envisageable de mettre à l'épreuve notre prototype sur d'autres relevés dans les mois à venir. Parmi les relevés tridimensionnels de plans-reliefs escomptés, des places fortes de montagnes ou de littoraux nous permettraient de déterminer les limites de notre méthode sur des cas d'étude pour lesquels les fortifications ont dû s'adapter à leurs environnements. Cela se traduit par des ouvrages qui s'écartent des modèles théoriques tels qu'ils sont décrits dans les traités de fortifications et par conséquent, dans l'ontologie actuelle.

Une autre limite de notre approche est qu'elle ne concerne que les données géométriques. Les informations d'ordre chromatique, ou photométrique, ne font pour l'instant l'objet d'aucun traitement dans notre approche. KASToR, qui utilise jusqu'à présent Grasshopper pour l'implémentation des algorithmes d'extraction et de reconstruction, nous a permis de valider notre approche, mais pour mener à terme les objectifs de reconstruction des fortifications, tant du point de vue géométrique (passage de la 2D à la 3D) que de la restitution des textures, le choix de Grasshopper peut être questionné du fait de ces li-

mites (récursivité, itération, interopérabilité, etc.) et des expérimentations sont à prévoir pour lever l'incertitude quant à la capacité de Grasshopper à remplir ces derniers objectifs.

Pour conclure, la méthode KASToR a pour principal atout son modèle de connaissance qui lui permet d'être en adéquation avec les exigences actuelles des bibliothèques numériques. Il garantit en effet un lien permanent (Ullrich et al., 2013 ; De Luca et al., 2006) entre la composante géométrique et la composante sémantique des objets extraits de données acquises à partir de patrimoine architectural. L'ontologie définie dans ce projet peut en effet être utilisée pour enrichir sémantiquement des objets géométriques qu'elle a déjà permis de reconstruire. Ces derniers sont dépourvus des défauts inhérents aux modèles bruts issus de l'acquisition tridimensionnelle, car, outre leur géométrie qui est optimisée et complète, ils sont également dotés d'une charge sémantique. Le relevé tridimensionnel des plans-reliefs est alors porteur de significations (Mazières, 2011) et peut être valorisé et diffusé dans des systèmes d'informations par le biais, en particulier, des technologies de l'information et de la communication (TIC) qu'elles soient matérielles (smartphones, tablettes, salles d'immersion, etc.), logicielles (moteurs de jeux vidéo,) ou de réseaux comme internet.

Bibliographie

ACADÉMIE FRANÇAISE, 1878. *Modèle* [en ligne]. 7. Paris : F. Didot. [Consulté le 8 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k50410d/f167.image.r=maquette>.

AGBODAN, Dago, 2002. *Nomination persistante dans un modèle paramétrique: identification non-ambigüe et appariement générique d'entités topologiques*. Thèse de doctorat. Poitiers, France : École doctorale des sciences pour l'ingénieur et aéronautique.

ALBY, Emmanuel, 2006. *Elaboration d'une Méthodologie de Relevé d'Objets Architecturaux*. Thèse de doctorat. Nancy, France, Henry Poincaré, Nancy 1.

ALBY, Emmanuel, ASSALI, Pierre, GRUSSENMEYER, Pierre, KAUFFMANN-SMIGIEL, Isabelle et SMIGIEL, Eddie, 2009. Low Cost Solutions for Dense Point Clouds of Small Objects: Photomodeler Scanner vs. David Laserscanner. In : *22nd CIPA Symposium 2009* [en ligne]. Japon. Disponible à l'adresse : <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/KYOTO/136.pdf>.

ALGRIN, Thierry, 1998. *Toul: remparts, restauration : études préalables*. Etude. Paris. Ministère de la Culture et de la Communication.

ALOEST, 2012. Modélisation 3D de Plans-Reliefs et intégration sur Google Earth. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://aloest.com/content/modélisation-3d-des-plans-reliefs-vieux-de-trois-siècles-sur-google-earth>.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1980. *Manual of photogrammetry*. 4th ed. Falls Church, Virginie, États-Unis : American Society of Photogrammetry.

ARTEC GROUP COMPANY, 2013. Artec 3D scanners. [en ligne]. 2013. Disponible à l'adresse : <http://www.artec3d.com/fr/about/>.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE TOPOGRAPHIE, 2012. Lexique topographique. [en ligne]. 2012. [Consulté le 2 mai 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.aftopo.org/FR/LEXIQUE/Termes-topographiques-concernant-l-orographie-et-l-hydrographie-7-81>.

AUTODESK LABS, 2012. *Autodesk Labs: Point Cloud Feature Extraction for Revit - Arc Walls Extraction* [en ligne]. 20 janvier 2012. [Consulté le 29 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.youtube.com/watch?v=7PIvfZfWqY8&feature=youtube_gdata_player.

BABELON, Jean-Pierre et CHASTEL, André, 2008. *La notion de patrimoine*. Paris, France : L. Levi.

BACHIMONT, Bruno, 2008. La conservation du patrimoine numérique : enjeux et tendance. In : *InaExpert* [en ligne]. 14 février 2008. [Consulté le 14 août 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.ina-expert.com/e-dossier-de-l-audiovisuel-patrimoine-numerique-memoire-virtuelle-memoire-commune/la-conservation-du-patrimoine-numerique-enjeux-et-tendance.html>.

BAE, Han-Seon, 2002. An Application of Photogrammetry Measuring Technology to Parametric Modeling of Korean Traditional Wooden Structure. In : *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia*. Cyberjaya, Malaisie. 2002. p. 139 - 146.

BAJARD, Alban, 2012. *Numérisation 3D de surfaces métalliques spéculaires par imagerie infrarouge* [en ligne]. Université de Bourgogne, France. [Consulté le 16 août 2013]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00845939>.

BAJARD, Alban, AUBRETON, Olivier, EREN, Gönen et TRUCHETET, Frederic, 2011. Application du Scanning From Heating à la numérisation 3D de surfaces métalliques spéculaires. In : *ORASIS - Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://hal.inria.fr/inria-00595265>.

BALLIET, Jean-Marie, 2009. *Artillerie et fortifications : cources manuscrites et imprimées : ouvrages anciens et modernes : notices bibliographiques critiques*. [en ligne]. 2009. Disponible à l'adresse : <http://www.fortifications.fr/Biblio%20%26%20publications/bibliographie-bi.html>.

BARDIN, Eugène, 2002. *Guillaume le Blond*. Paris, France : Institut de Stratégie Comparée - Commission Française d'Histoire Militaire.

BASE PALISSY, 1913. *Collection de 101 maquettes : plans-reliefs de places de guerre* [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://www.culture.gouv.fr/public/mistral/palsri_fr?ACTION=CHERCHER&FIELD_1=REF&VALUE_1=PM75002093.

BASE PALISSY, 1978. *Maquette : plan-relief de la Rome antique* [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://www.culture.gouv.fr/public/mistral/palsri_fr?ACTION=CHERCHER&FIELD_1=REF&VALUE_1=PM14001292.

BAUGESCHICHTLICHES ARCHIV, 2013. Zürich um 1800 – Historisches Stadtmodell. In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.stadtmodell-zuerich.ch/>.

BELIDOR, Bernard Forest de, 1755. *Dictionnaire portatif de l'ingénieur: où l'on explique les principaux termes des sciences les plus nécessaires à un ingénieur, sçavoir: l'arithmétique, l'algèbre, la géométrie...* Charles-Antoine Jombert.

BÉLIDOR, Bernard Forest de, 1729. *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile* [en ligne]. Paris : Charles Antoine Jombert. Disponible à l'adresse : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k856819.r=belidor.langFR>. Gallica

BERGIN, Michael S, 2011. History of BIM. In : *Architecture Research Lab* [en ligne]. [Consulté le 30 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.architectureresearchlab.com/arl/2011/08/21/bim-history/>.

BERTHELOT, Michel, 2008. Le programme 3D-monuments. Méthodes, outils, expérimentations. In : *Culture & Recherche*. n° 118 - 119, p. 18.

BERTIN, Jacques, 1999. *Sémiologie graphique les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Paris : Ed. de l'EHESS, France.

BESNARD, Marie-Pierre, 2008. *La mise en valeur du patrimoine culturel par les nouvelles technologies*. Caen : Presse Universitaire de Caen, France. Schedae.

BEY, Aurélien, 2012. *Reconstruction de modèles CAO de scènes complexes à partir de nuages de points basée sur l'utilisation de connaissances a priori*. Lyon : Claude Bernard Lyon 1, France.

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE, 2011. BnF - Modélisation et ses applications. [Consulté le 30 juin 2011]. Disponible à l'adresse : http://www.bnf.fr/fr/professionnels/modelisation_ontologies.html.

BILASCO, Ioan Marius, 2007. *Une approche sémantique pour la réutilisation et l'adaptation de données 3D*. Grenoble, France : Joseph Fourier.

BILLEN, Rolan, BLAIN, Pascal, DONNEAU, Olivier, HABRAKEN, Serge, RENOTTE, Yvon et VAN RUYMBEKE, Muriel, 2009. Virtual model of the city of Liège in the eighteen century-« Virtual Leodium ». In : *Proceedings of 3D Stereo MEDIA 2009, International 3D Stereo Film and Technology Festival (3D Stereo MEDIA)*. Liège, Belgique : Jacques Verly.

BILLEN, Roland, 2012. Virtual Leodium : une tentative de modélisation spatio-temporelle 3D de l'information historique relative à l'urbanisme liégeois. In : *Ecole thématique MoDyS 2012 [MOVE_REAL]*. powerpoint. Nice, France.

BLAISE, Jean-Yves, CHEVRIER, Christine, LUCA, Livio De, SALERI, Renato, DUDEK, Iwona et CIBLAC, Thierry, 2013. Axe 1 : Modèles, méthodes et outils pour l'étude du bâti patrimonial. In : *UMR 3495 CNRS/MCC MAP* [en ligne]. [Consulté le 7 août 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.map.archi.fr/?page_id=34.

BLANCHARD, Anne, 1979. *Les Ingénieurs du roy, de Louis XIV à Louis XVI : étude du corps des fortifications* [en ligne]. Thèse. Montpellier, France. [Consulté le 22 mai 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.sudoc.fr/000320382>.

BLONDEL, François, 1683. *Nouvelle manière de fortifier les places*. Paris, France : l'auteur et N. Langlois.

BOEHLER, Wolfgang, HEINZ, Guido, MARBS, Andreas et SIEBOLD, Mirko, 2002. 3d scanning software: an introduction. In : *International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*. Corfu, Grèce. p. 42-47.

BOEYKENS, Stefan, 2011. Using 3D Design software, BIM and game engines for architectural historical reconstruction. In : *Proceedings of the 14th international conference on Computer Aided Architectural Design*. Liège, Belgique : Pierre Leclercq, Ann Heylighen, Geneviève Martin. p. 494 - 510.

BOEYKENS, Stefan, 2012. Bridging building information modeling and parametric design. In : GUDNASON, Gudni et SCHERER, Raimar (éd.), *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction* [en ligne] : CRC Press. p. 453-458. [Consulté le 23 août 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.academia.edu/1941872/Bridging_Building_Information_Modeling_and_Parametric_Design.

BOEYKENS, Stefan, HIMPE, Caroline et MARTENS, Bob, 2012. A Case Study of Using BIM in Historical Reconstruction. The Vinohrady Synagogue in Prague. In : *Digital Physicality | Physical Digitality*. p. 729-738.

BÖHM, Jan, BECKER, Susanne et HAALA, Norbert, 2007. Model refinement by integrated processing of laser scanning and photogrammetry. In : *Proceedings of 2nd International Workshop on 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-Arch)* [en ligne]. [Consulté le 20 août 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.researchgate.net/publication/37685996_Model_Refinement_by_Integrated_Processing_of_Laser_Scanning_and_Phogrammetry/file/60b7d518cf0f08548e.pdf.

BOISSIEU, Aurélie de, 2013. *Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie*. Paris, France : Université Paris Est.

BOISSIEU, Aurélie de et GUÉNA, François, 2012. Grasshopper et la programmation sur Rhinoceros 4: une introduction. In : *DNArch* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://dnarchi.fr/outils/grasshopper-et-la-programmation-sur-rhinoceros-4-une-introduction/>.

BONVIN, Frédérique, CONNOLLY, Isabel et MUSÉE D'ART ET D'HISTOIRE, 1991. *Album destiné à découvrir le relief de Genève en 1850 et contenant des documents, questions & jeux sur le relief et son auteur*

Aug. Magnin, *architecte* [en ligne]. Genève : Bureau animation pédagogie du Musée d'art et d'histoire. [Consulté le 21 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://doc.rero.ch/record/28744?ln=fr>.

BOTTINO, Andrea et MARTI, Andrea, 2010. The Role of Computer Games Industry and Open Source Philosophy in the Creation of Affordable Virtual Heritage Solutions. In : JOO, Meng (éd.), *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems* [en ligne]. : Sciyo. [Consulté le 19 décembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.intechopen.com/books/new-trends-in-technologies--devices--computer--communication-and-industrial-systems/the-role-of-computer-games-industry-and-open-source-philosophy-in-the-creation-of-affordable-virtual>.

BOUCON, Jean, 2007. *Sur les pas de Vauban en Lorraine et au-delà des frontières*. Metz, France : Éd. Serpenoise.

BOUSQUET-BRESSOLIER, Catherine, 2008. Études & Formation des Ingénieurs sous Vauban. In : *Le Monde des cartes*. n° 195, p. 15–26.

BRADLEY, Colin et CURRIE, Bernadette, 2005. Advances in the Field of Reverse Engineering. In : *Computer-Aided Design and Applications*. Vol. 2, n° 5, p. 697-706.

BRANQUINHO DE OLIVEIRA, José António, 2012. *Modern Programming for Generative Design* [en ligne]. Master of Science in Information Systems and Computer Engineering. Lisbonne, Portugal : Technical University of Lisbon. Disponible à l'adresse : <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1106660/1/dissertacao.pdf>.

BREGIANNI, Angeliki, 2013. *BIM Development for Cultural Heritage Management* [en ligne]. 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. Disponible à l'adresse : http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/8297/1/bregianni_thesis_rv.pdf.

BRISAC, Catherine, 1981. *Le musée des plans-reliefs : Hôtel national des invalides*. Paris, France : Pygmalion : G. Watelet.

BURIÁNEK, Jan, 2011. Digital Langweil model of Prague. In : *Proceedings of XXIII CIPA Symposium*. Prague, République Tchèque.

CAMARERO, Ricardo, 2013. Cours: MEC6212 - Maillages et modélisation géométrique. In : [en ligne]. [Consulté le 9 août 2012]. Disponible à l'adresse : <https://moodle.polymtl.ca/course/view.php?id=262>.

CANTZLER, Helmut, FISHER, Robert B. et DEVY, Michel, 2002. Improving architectural 3D reconstruction by plane and edge constraining. In : *Proceedings of British Machine Vision Conference* [en ligne]. : Citeseer. p. 43-52. Disponible à l'adresse : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.107.2055&rep=rep1&type=pdf>.

CARINI, Angelo et GENNA, Francesco, 2012. Stability and strength of old masonry vaults under compressive longitudinal loads: Engineering analyses of a case study. In : *Engineering Structures*. Vol. 40, n° 0, p. 218-229.

CARLET, Christian, 2011. *Le montage d'un plan-relief* [en ligne]. Grand Palais. [Consulté le 17 mai 2012]. Disponible à l'adresse : <http://lafranceenrelief.maison-histoire.fr/experience-3d/les-techniques-de-realisation/>.

CARPENTIER, Jean et LEBRUN, François, 2000. *Histoire de France* : Seuil. Points Histoire, numéro 125.

CENTOFANTI, Mario, CONTINENZA, Romolo, BRUSAPORCI, Stefano et TRIZIO, Ilaria, 2011. The Architectural Information System Siarch3D-Univaq for Analysis and Preservation of Architectual Heritage. In : *Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop*. Trente, Italie : Fabio Remondino, Sabry El-Hakim. 2011.

CHAMBERS, Ephraim, 1753. *Fortification* [en ligne]. London : Ephraim Chambers. Disponible à l'adresse : <http://uwdc.library.wisc.edu/collections/HistSciTech/Cyclopaedia>.

CHANTEPIE, Philippe, 2008. Usages numériques : patrimonialisation et/ou création ? In : *Culture & Recherche*. n° 118 - 119, p. 30.

CHASLIN, François, 2012. *Les plans-reliefs* [en ligne]. [Consulté le 14 mars 2012]. Métropolitains. Disponible à l'adresse : <http://www.franceculture.fr/emission-metropolitains-les-plans-reliefs-2012-02-05>.

CHATENET, Monique, VERDIER, Hélène, DAVOIGNEAU, Jean, BENOÎT-CATTIN, Renaud et INVENTAIRE GÉNÉRAL DES MONUMENTS ET DES RICHESSES ARTISTIQUES DE LA FRANCE, 2000. *Thésaurus de l'architecture* [en ligne]. Paris, France : Ed. du Patrimoine. Disponible à l'adresse : <https://www.google.fr/search?q=Th%C3%A9saurus+de+l%27architecture&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a>.

CHEVRIER, Christine, JACQUOT, Kevin et PERRIN, Jean-Pierre, 2010. 3D Modelling of a Town Scale Model. In : *Proceedings of EuroMed 2010, 3rd International Conference dedicated on Digital Heritage*. Limassol, Chypre : Springer. p. 99 - 107.

CHEVRIER, Christine et PERRIN, Jean-Pierre, 2009. Generation of architectural parametric components : cultural heritage 3D modelling. In : *CAAD futures*. p. 1 - 14.

CHING, Francis D. K., 2012. *Architecture: Form, Space, and Order*. 3. S.l. : John Wiley & Sons.

CHOAY, Françoise, 1996. *L'Allégorie du patrimoine*. Paris, France : Éd. du Seuil.

CHOAY, Françoise, 2009. *Le patrimoine en questions anthologie pour un combat*. Paris, France : Éd. du Seuil.

CITÉ DE L'ARCHITECTURE ET DU PATRIMOINE, 2011. *La maquette : un outil au service du projet architectural* [en ligne] : Cité de l'architecture et du patrimoine. Disponible à l'adresse : http://www.citechaillot.fr/data/auditorium_c49f4/fiche/911/brochurecolloquemaquettes_2968a.pdf.

CNRTL, 2012. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. In : *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales* [en ligne]. [Consulté le 30 août 2011]. Disponible à l'adresse : <http://www.cnrtl.fr/definition/>.

CODE DU PATRIMOINE. - ARTICLE L622-1 [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000006845875&cidTexte=LEGITEX T000006074236&dateTexte=20050909&oldAction=rechCodeArticle>

CONSEIL DE L'EUROPE, 2009. France : Politique de numérisation. In : *European Heritage Network - Réseau Européen du Patrimoine* [en ligne]. [Consulté le 3 août 2012]. Disponible à l'adresse : http://european-heritage.net/sdx/herein/national_heritage/voir.xsp?id=7.1_FR_fr.

CORMONTAIGNE, Louis de, 1741. *Architecture militaire, ou l'Art de fortifier* [en ligne]. la Haye, Pays-Bas : Jean Neaulme et Adrien Moetjens. Disponible à l'adresse : <http://books.google.fr/books?id=hIE-AAAAcAAJ>.

CORMONTAIGNE, Louis de, 1809. *Mémorial pour la fortification permanente et passagère*. [en ligne]. Paris, France : Charles Barrois. Œuvres posthumes de Cormontaigne, ou mémorial pour la fortification, l'attaque et la défense des places, enrichi d'addition, tirées des autres manuscrits de l'auteur. Disponible à l'adresse : <http://books.google.fr/books?id=6ikpAAAAYAAJ&hl=fr&pg=PR3#v=onepage&q&f=false>.

COSTE, Anne, 1998. La simulation du comportement mécanique des monuments anciens. In : *Maquettes d'architecture*. Paris, France : Éd. du Patrimoine.

COTTE, Dominique, 2004. Le concept de « document numérique ». In : *Communication et langages*. Vol. 140, n° 1, p. 31-41.

COUTURIER, Arnaud, 2013. Suiscidal City Generator. Disponible à l'adresse : <http://cgchan.com/suicidator/>.

D'ANDREA, Andrea, NICCOLUCCI, Franco, BASSETT, Sheena et FERNIE, Kate, 2012. 3D-ICONS: World Heritage sites for Europeana: Making complex 3D models available to everyone. In : *Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012 18th International Conference on* [en ligne]. p. 517-520. [Consulté le 28 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6365966.

DASSAULT SYSTEM, 2012. *Giza3D* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://giza3d.3ds.com/#discover>.

DAVID VISION SYSTEMS, 2013. DAVID 3D Scanner. In : *DAVID Vision Systems* [en ligne]. [Consulté le 31 décembre 2011]. Disponible à l'adresse : <http://www.david-laserscanner.com/>.

DAVIS, Daniel, BURRY, Jane et BURRY, Mark, 2011. Untangling parametric schemata: enhancing collaboration through modular programming. In : *Proceedings of the 14th international conference on Computer Aided Architectural Design, University of Liege*. Liège, Belgique [en ligne]. [Consulté le 22 août 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.nzarchitecture.com/image/caadfutures2011.pdf>.

DE LUCA, Livio, VERON, Philippe et FLORENZANO, Michel, 2006. Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach. In : *Comput. Graph.* Vol. 30, n° 2, p. 160-176.

DEBRAY, Régis, 1999. Trace, forme ou message? In : *La confusion des monuments*. Vol. 7, p. 27-44.

DEKEYSER, Fabien, GASPARD, François, FLORENZANO, Michel, DE LUCA, Livio, CHEN, Xin et LERAY, Pascal, 2003. Cultural heritage recording with laser scanning, computer vision and exploitation of architectural rules. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 34, n° 5/W12, p. 145-149.

DESVALLÉES, André, 1995. Termes muséologiques de base. In : *Publics et Musées*. Vol. 7, n° 1, p. 134-158.

DIDEROT, Denis et D'ALEMBERT, Jean le Rond, 1751. *Fortification*. Paris, France : Briasson, David, le Breton, Durand.

DÖLLNER, Jürgen, KOLBE, Tomas H., LIECKE, Falko, SGOUROS, Takis et TEICHMANN, Karin, 2006. The virtual 3d city model of berlin-managing, integrating, and communicating complex urban information. In : *Proceedings of the 25th Urban Data Management Symposium UDMS*. Aalborg, Danemark. p. 15-17.

DYLLA, Kimberly, FRISCHER, Bernard, MUELLER, Pascal, ULMER, Andreas et HAEGLER, Simon, 2009. Rome Reborn 2.0: A Case Study of Virtual City Reconstruction Using Procedural Modeling Techniques. In : *37th Proceedings of the CAA Conference*. Williamsburg, Virginie, États-Unis. p. 62-66.

- EASTMAN, Chuck, 2011. *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Hoboken, New Jersey, États-Unis : Wiley.
- EBERT, David S, 2003. *Texturing & modeling : a procedural approach*. San Francisco, Californie, États-Unis : Morgan Kaufmann.
- EL-HAKIM, Sabry, BERALDIN, J.-Angelo et PICARD, Michel, 2002. Detailed 3D reconstruction of monuments using multiple techniques. In : *Proceedings of the International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording-Complementing or Replacing Photogrammetry*. Corfou, Grèce. p. 58-64.
- EL-MEKAWY, Mohamed et ÖSTMAN, Anders, 2010. Semantic Mapping: an Ontology Engineering Method for Integrating Building Models in IFC and CITYGML. In : *Proceedings of the 3rd ISDE Digital Earth Summit*. Nessebar, Bulgarie. p. 12-14.
- ERRARD DE BAR-LE-DUC, Jean, 1600. *La Fortification démontrée et réduite en art par feu I. Errard de Bar Le Duc ingénieur du très chrestien roy de France et de Navarre. Revue corrigée & augmentée par A. Errard son neveu aussi Ingenieur du Roy suivant les memoires de l'Auteur*. [en ligne]. Paris, France. Disponible à l'adresse : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k85639h>.
- ESRI, 2013. Esri CityEngine. Disponible à l'adresse : <http://www.esri.com/software/cityengine>.
- ETH ZÜRICH, 2013. Abgeschlossene Projekte. Disponible à l'adresse : <http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/research/projects>.
- FAI, Stephen, GRAHAM, Katie, DUCKWORTH, Todd et WOOD, Nevil, 2011. Building Information Modeling and Heritage Documentation. In : *Proceedings of XXIII CIPA Symposium* [en ligne]. Prague, République Tchèque. Disponible à l'adresse : <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/047.pdf>.
- FAUCHERRE, Nicolas et FRANÇOIS, Serge, 1996. *Places fortes, bastion du pouvoir*. Paris, France : Rempart. Patrimoine vivant.
- FAUCHERRE, Nicolas, MONSAINGEON, Guillaume et ROUX, Antoine de, 2007. *Les plans en relief des places du Roy*. Centre des monuments nationaux.
- FAYARD, Franck, 2010. *Génération de MNT d'une zone montagneuse par radargrammétrie et approche multi-échelle* [en ligne]. INSA de Rennes, France. [Consulté le 10 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00820847>.
- FLEURY, Philippe et MADELEINE, Sophie, 2010. An Interactive Visit to the City of Rome in the Fourth Century A.D. In : *Making history interactive: computer applications and quantitative methods in archaeology (CAA): proceedings of the 37th international conference, Williamsburg, Virginia, United States of America*. Oxford : Archaeopress. p. 67-75.
- FOLIO, Gérard, FRANCE. MINISTÈRE DE LA DÉFENSE. SECRÉTARIAT GÉNÉRAL POUR L'ADMINISTRATION. et SÉMINAIRE BASTION (PARIS), 2008. L'École Française de Fortification au XVIIe siècle. In : *La citadelle et la place de Saint-Jean-Pied-de-Port de la Renaissance à l'époque contemporaine*. Vincennes, France : Centre d'études d'histoire de la défense. Cahier du CEHD, 25. p. 45-71.
- FRAYSSE, Patrick, 2008. Effets du système d'information sur l'évolution de la notion de patrimoine. In : *L'information dans les organisations : dynamique et complexité* [en ligne]. Tours, France : Presses universitaires F. Rabelais. p. 303-314. Disponible à l'adresse : <http://books.openedition.org/pufr/733>.
- FREDERICQUE, Benoit, 2008. *Saisie photogrammétrique multi-représentation de bâtiments. Une approche Semi-Automatisée Initialisée et Supportée par l'Intervention humaine* [en ligne]. Laval, France. [Consul-

té le 29 juin 2012]. Disponible à l'adresse :
<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/25094/25094.html>.

FRISCHER, Bernard, 2008. *Beyond illustration: 2D and 3D digital technologies as tools for discovery in archaeology* [en ligne]. Oxford : Archaeopress. BAR international series. Disponible à l'adresse :
http://archive1.village.virginia.edu/spw4s/Beyond/BeyondIllustration_experiment2_sm.pdf.

FUCHS, Alain, 2006. *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique* [en ligne]. Thèse de doctorat. Nancy, France, Henry Poincaré, Nancy 1. Disponible à l'adresse :
<http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00145277/>.

GALLO, Alessandro, MUZZUPAPPA, Maurizio et BRUNO, Fabio, en presse. 3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images. In : *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. en presse. [Consulté le 16 septembre 2013]. Disponible à l'adresse :
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207413001416>.

GARAGNANI, Simone et MANFERDINI, Anna Maria, 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, 2013* [en ligne]. Trente, Italie. p. 87-92. Disponible à l'adresse : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W1/87/2013/isprsarchives-XL-5-W1-87-2013.pdf>.

GARRIC, Jean-Philippe, 2009. La maquette contre la perspective. Rivalité de types de représentation en trois dimensions en France au 19^e siècle. In : *Résumés des interventions* [en ligne]. Technische Universität, Munich, Allemagne. p. 44. Disponible à l'adresse :
http://www.sabinefrommel.eu/Booklet_Kolloquium_ModelleUndArchitektur.pdf.

GIRARD, Christian, 1986. *Architecture et concepts nomades : Traité d'indiscipline*. Editions Mardaga.

GIRAUD, Frédéric, 2013. *Acquisition, Numérisation et Modélisation de Plans-Reliefs et Maquettes de Ville*. Rapport de stage. Nancy, France. Map-Crai.

GIRAUD, Frédéric, JACQUOT, Kevin, CHEVRIER, Christine et HALIN, Gilles, 2013. Acquire High Quality Meshes of Scale Models for an Automatic Modelling Process. In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Strasbourg, France. p. 277-282.

GLETSCHERGARTEN LUZERN, 2013. Relief de la Suisse centrale de Franz Ludwig Pfyffer von Wyher. In : *Jardin des Glaciers de Lucerne* [en ligne]. [Consulté le 3 juillet 2013]. Disponible à l'adresse :
<http://www.gletschergarten.ch/Relief-de-General-Pfyffer.73.0.html?&L=1>.

GOLVIN, Jean-Claude, 2003. *Cours de Tunis. L'image de restitution et la restitution de l'image. Vol. 1 et 2* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.unicaen.fr/cireve/rome/pdf/COURS1.pdf>.

GOODCHILD, Michael F. et HUNTER, Gary J., 1997. A simple positional accuracy measure for linear features. In : *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 11, n° 3, p. 299-306.

GROBLER, Francois, AKSAMIJA, Aksamija, KIM, Kim, KRISHNAMURTI, Ramesh, YUE, Kui et HICKERSON, Casey, 2008. Ontologies and Shape Grammars: Communication between Knowledge-Based and Generative Systems. In : *Design Computing and Cognition '08*. p. 23 - 40.

GRUSSENMEYER, Pierre, HANKE, Klaus et STREILEIN, André, 2002. Architectural photogrammetry. In : *Digital photogrammetry* [en ligne]. London; New York : Taylor & Francis. p. 300. [Consulté le 22 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.civilium-ju.com/uploads/New/Highway%20and%20Traffic%20Section/Aerial%20Photogrammetry/Photogrammetry%20-%20Digital%20Photogrammetry%20-%20EGELS.pdf>.

GUARINO, Nicola, 1997. Semantic matching: Formal ontological distinctions for information organization, extraction, and integration. In : PAZIENZA, Maria Teresa (éd.), *Information Extraction A Multidisciplinary Approach to an Emerging Information Technology* [en ligne]. Springer Berlin Heidelberg. Lecture Notes in Computer Science. p. 139-170. [Consulté le 4 août 2013]. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com.bases-doc.univ-lorraine.fr/chapter/10.1007/3-540-63438-X_8.

GUIDI, Gabriele, FRISCHER, Bernard, DE SIMONE, Monica, CIOCI, Andrea, SPINETTI, Alessandro, CAROSSO, Luca, LOREDANA MICOLI, Laura, RUSSO, Michele et GRASSO, Tommaso, 2005. Virtualizing ancient Rome: 3D acquisition and modeling of a large plaster-of-Paris model of imperial Rome. In : *Proceedings of SPIE* [en ligne]. San José, Californie, États-Unis p. 119-133. Disponible à l'adresse : <http://link.aip.org/link/?PSI/5665/119/1&Agg=doi>.

GUIDI, Gabriele, FRISCHER, Bernard et LUCENTI, Ignazio, 2007. Rome Reborn – Virtualizing The Ancient Imperial Rome. In : *Workshop on 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures* [en ligne]. ETH Zurich, Switzerland : Fabio Remondino, Sabry El-Hakim. [Consulté le 30 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.researchgate.net/publication/228632513_ROME_REBORNVIRTUALIZING_THE_ANCIENT_IMPERIAL_ROME/file/d912f50b254974909c.pdf.

GUILLAUME, Jean, 1988. Les traités d'architecture de la Renaissance : actes du colloque tenu à Tours du 1. au 11 juillet 1981. In : CHASTEL, André (éd.). Paris, France : Picard. p. 508.

HAEGLER, Simon, MÜLLER, Pascal et VAN GOOL, Luc, 2009. Procedural modeling for digital cultural heritage. In : *Journal on Image and Video Processing*. 2009. Vol. 2009, p. 7.

HATT, Thierry, 2004. *Le plan relief de 1725 de Strasbourg, étude de la fiabilité documentaire du plan* [en ligne]. Musée Historique de Strasbourg, France. Disponible à l'adresse : <http://thierry.hatt.gps.free.fr/01-site-acad-tous-pdf/tct.htm>.

HAVEMANN, Sven, 2005. *Generative Mesh Modeling*. Allemagne : Braunschweig Technical University.

HERVY, Benjamin, BILLEN, Roland, LAROCHE, Florent, CARRÉ, Cyril, SERVIÈRES, Myriam, VAN RUYMBEKE, Muriel, TOURRE, Vincent, DELFOSSE, Vincent et KEROUANTON, Jean-Louis, 2012. A generalized approach for historical mock-up acquisition and data modelling: Towards historically enriched 3D city models. In : *Usage, Usability, and Utility of 3D City models* [en ligne]. Les Ulis, France : EDP Sciences. [Consulté le 1 juin 2013]. Disponible à l'adresse : <http://3u3d.edpsciences.org/10.1051/3u3d/201202009>.

HINARD, François et ROYO, Manuel, 1992. *Rome: l'espace urbain & ses représentations*. Paris] : [Tours : Presses de l'Université de Paris-Sorbonne ; Maison des sciences de la ville (Université de Tours). Passé présent.

HMIDA, Helmi Ben, CRUZ, Christophe, BOOCHS, Frank et NICOLLE, Christophe, 2012. Knowledge Base Approach for 3D Objects Detection in Point Clouds Using 3D Processing and Specialists Knowledge. In : *International Journal on Advances in Intelligent Systems*. Vol. 5, n° 1 & 2.

HOUSEN, Jean, 2010. Notice sur Gustave Ruhl (Collections artistiques de l'université de Liège). In : *Collections artistiques de l'Université de Liège* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.witert.ulg.ac.be/fr/don/ruhl.html>.

HULLO, Jean-François, 2010. Acquisition de nuages de points denses par photogrammétrie terrestre. In : *XYZ*. mars 2010. Vol. 122, p. 19-26.

IBELE, Tyson, 2013. Building Generator. Disponible à l'adresse : <http://www.tysonibele.com/Main/BuildingGenerator/buildingGen.htm>.

INHA, MUSÉE DES PLANS-RELIEFS et CDHTE-CNAM, 2010. *Livret des résumés de la 5e Journée d'étude du Musée des Plans-reliefs (Paris) - Les savoirs de l'ingénieur militaire. Manuels, cours et cahiers d'exercices (1751-1914)*.

INSA-STRASBOURG, 2013. Cours en ligne de photogrammétrie. Disponible à l'adresse : <http://www.insa-strasbourg.fr/fr/photogrammetrie/>.

JACQUES, Annie, 1988. *Les architectes de la liberté*. Paris, France : Gallimard. Découvertes Gallimard ; Architecture, 47.

JACQUOT, Kevin, 2010. *Restitution des Plans-Reliefs datant du XIXe siècle* [en ligne]. Rapport de stage. Nancy, France. Map-Crai. Disponible à l'adresse : <http://www.crai.archi.fr/media/pdf/JACQUOT-MemoireAME.pdf>.

JANSSEN, Patrick et CHEN, Kim Wee, 2011. Visual Dataflow Modelling: A Comparison of Three Systems. In : *Proceedings of the 14th international conference on Computer Aided Architectural Design*. Liège, Belgique : Pierre Leclercq, Ann Heylighen, Geneviève Martin. p. 802 - 816.

JEDRZEJAS, Thomas, 2008. *Aufbau historischer städtischer 3D-Szenarien für eine Nutzung unter Google Earth, basierend auf Daten von terrestrischem Laserscanning, Photogrammetrie und Archivinformationen*. [en ligne]. Bochum, Allemagne : Hochschule Bochum. Disponible à l'adresse : http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb_v/labore/photogrammetrie/Absolventen/Diplomarbeit-Jedrzejjas.pdf.

JOUTY, Sylvain et ODIER, Hubert, 2009. *Plan-relief*. Omnibus.

KALANTARI, Mahzad et KASSER, Michel, 2008. Photogrammétrie et vision par ordinateur. In : *Revue XYZ*. n° 117, p. 49-54.

KARRER, Jean-Marc, 2005. Metrologie tridimensionnelle. cours. Institut Universitaire de Technologie de Mulhouse. Disponible à l'adresse : <http://jm.karrer.free.fr/documents/MMT1.pdf>.

KEFFER, Brian, 2011. Ninja City - Misc Utility / External Scripts / Plugins for Maya. In : *Creative-Crash* [en ligne]. [Consulté le 28 octobre 2011]. Disponible à l'adresse : <http://www.creativecrash.com/maya/marketplace/scripts-plugins/utility-external/misc/c/ninja-city--2>.

KELLY, Tom, 2013. *Unwritten Procedural Modeling with Skeletons*. University of Glasgow, Royaume-Uni.

KEMENY, John et TURNER, Keith, 2008. FHWA-CFL/TD-08-006 : *Ground-Based LiDAR Rock Slope Mapping and Assessment* [en ligne]. Final Report. University of Arizona, États-Unis. Disponible à l'adresse : http://www.cflhd.gov/programs/techDevelopment/geotech/LiDAR/documents/04_chapter_2_lidar_hardware.pdf.

KERSTEN, Thomas P., KELLER, Friedrich, SAENGER, Jerome et SCHIEWE, Jochen, 2012. Automated generation of an historic 4d city model of hamburg and its visualisation with the GE engine. In : *Proceedings of the 4th international conference on Progress in Cultural Heritage Preservation* [en ligne]. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag. p. 55-65. [Consulté le 30 mai 2013]. Disponible à l'adresse : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_6.

KERSTEN, Thomas P. et LINDSTAEDT, Maren, 2012. Image-Based Low-Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects. In : IOANNIDES, Marinos, FRITSCH, Dieter, LEISSNER, Johanna, DAVIES, Rob, REMONDINO, Fabio et CAFFO, Rossella (éd.), *Progress in Cultural Heritage Preservation* [en ligne]. Springer Berlin Heidelberg. Lecture Notes in Computer Science, 7616. p. 1-10. [Consulté le 24 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-34234-9_1.

KOUTSOUDIS, Anestis, VIDMAR, Blaž et ARNAOUTOGLU, Fotis, 2013. Performance Evaluation of a Multi-Image 3D Reconstruction Software on a Low-Feature Artefact. In : *Journal of Archaeological Science* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440313002525>.

KOUTSOUDIS, Anestis, VIDMAR, Blaž, ARNAOUTOGLU, Fotis et REMONDINO, Fabio, 2013. *Case Studies for Testing the Digitisation Process - interim report*.

KOUTSOUDIS, Anestis, VIDMAR, Blaž, IOANNAKIS, George, ARNAOUTOGLU, Fotis, PAVLIDIS, George et CHAMZAS, Christodoulos, 2012. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. In : *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207412001926>.

LA MANTIA, Mariella et LANFRANCHI, Fabio, 2013. The Reverse Modelling realized by digital scans and fotomodellazione: based on post-processing compared several noteworthy episodes contained in the Basilical Complex of San Lorenzo Fuori Le Mura in Rome. In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XL-5/W1, p. 147-152.

LANDES, Tania et GRUSSENMEYER, Pierre, 2011. Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (1/2). In : *Revue XYZ*. n° 128, p. 37-49.

LANDRIEU, Jérémie, PÈRE, Christian, ROLLIER, Juliette, CASTANDET, Stéphanie et SCHOTTE, Guillaume, 2011. Digital rebirth of the greatest church of Cluny Maior Ecclesia: From optronic surveys to real time use of the digital Model. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16, 2011* [en ligne]. Trente, Italie : Fabio Remondino, Sabry El-Hakim. Disponible à l'adresse : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-5-W16/31/2011/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-31-2011.pdf>.

LANGINS, Janis, 2007. L'ingénieur systématique contre les systèmes. In : WARMOES, Isabelle et SANGER, Victoria, *Vauban, bâtisseur du Roi-Soleil: [exposition, Paris, Cité de l'architecture et du patrimoine, 13 novembre 2007-5 février 2008]*. Paris, Paris : Somogy : Cité de l'architecture et du patrimoine : Musée des plans-reliefs. p. 330 - 339.

LANMAN, Douglas et TAUBIN, Gabriel, 2009. Build Your Own 3D Scanner: Optical Triangulation for Beginners. In : [en ligne]. SIGGRAPH Asia 2009 Courses. Disponible à l'adresse : <http://mesh.brown.edu/byo3d/slides.html>.

LAROCHE, Florent, KEROUANTON, Jean-Louis et BERNARD, Alain, 2011. A case study of capitalisation and valorisation of our technical heritage. In : *Global Product Development, Proceedings of the 20th CIRP Design Conference*. Nantes, France : Springer Berlin Heidelberg. p. 521-533.

LAROCHE, Florent, SERVIÈRES, Myriam, LEFÈVRE, Daniel et KEROUANTON, Jean-Louis, 2011. Where virtual enhances physical mock-up: a way to understand our heritage. In : *Proceedings of 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Bâle, Suisse.

LE BLOND, Guillaume, 1756. *Elémens de fortification : contenant les principes & la description raisonné des differens ouvrages qu'on employe à la Fortification des Places ; les Systèmes des principaux Ingénieurs, & un Traité abrégé de la Fortification irrégulière. Troisième édition, augmentée de plus d'un tiers*. [en ligne]. Consulté le 1 février 2011]. Disponible à l'adresse : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b2300599f>.

LE BLOND, Guillaume, 1780. *Traité de l'attaque des places* [en ligne]. Paris: L. Cellot. [Consulté le 5 janvier 2012]. Disponible à l'adresse : <http://books.google.fr/ebooks/reader?id=8TUUAAAQAAJ&hl=fr&printsec=frontcover&output=reader>.

LEE, A., AOUAD, G., COOPER, Rachel, FU, C., MARSHALL-PONTING, A. J., TAH, J. H. M. et WU, S., 2005. nD modelling-a driver or enabler for construction improvement. In : *RICS Research Paper Series, RICS, London*. Vol. 5, n° 6, p. 1-16.

LENIAUD, Jean-Michel, 2009. La maquette et le projet d'architecture au 19e siècle. In : *Résumés des interventions* [en ligne]. Technische Universität, Munich, Allemagne. p. 56. Disponible à l'adresse : http://www.sabinefrommel.eu/Booklet_Kolloquium_ModelleUndArchitektur.pdf.

LEPAGE, Jean-Denis, 2010. *Vauban and the French military under Louis XIV: an illustrated history of fortifications and strategies*. Jefferson, Caroline du Nord, États-Unis : McFarland & Co.

LÉVI-STRAUSS, Claude, 1962. *La pensée sauvage* [en ligne]. Paris : Plon.. Disponible à l'adresse : <http://ia600300.us.archive.org/10/items/lapenseesauvage00levi/lapenseesauvage00levi.pdf>.

LEWIS, Michael J., 1994. Utopia and the Well-ordered Fortress: J.M. Von Schwalbach's Town Plans of 1635. In : *Architectural History*. Vol. 37, p. 25-36.

LITTRÉ, Émile, 1873. *Modèle* [en ligne]. Paris : L. Hachette. [Consulté le 8 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5460034d>.

LOI DU 31 DECEMBRE 1913 SUR LES MONUMENTS HISTORIQUES - ARTICLE 22 [en ligne]. In : *Journal Officiel*, du 01 janvier 1914, p. 129-132. Disponible à l'adresse : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=00D805F8BE4EA829B791487711DDD02A.tp djo10v_2?cidTexte=JORFTEXT000000315319&idArticle=LEGIARTI000006847169&dateTexte=19140104 &categorieLien=id

LOMBAERDE, Piet, 2007. L'héritage de Vauban dans les projets de fortifications au XVIIIe siècle et XIXe siècles. In : WARMOES, Isabelle et SANGER, Victoria, *Vauban, bâtisseur du Roi-Soleil: [exposition, Paris, Cité de l'architecture et du patrimoine, 13 novembre 2007-5 février 2008]*. Paris, France : Somogy : Cité de l'architecture et du patrimoine : Musée des plans-reliefs. p. 320 - 329.

LORENZINI, Fabio, 2009. Semantic Approach to 3D Historical reconstruction. In : *Proceedings of the 3rd ISPRS International Workshop*. Trento, Italie : Fabio Remondino, Sabry El-Hakim, Lorenzo Gonzo.

LOTTE, Anne, 1985. La collection du Centre de Recherches sur les M.H. In : *Les maquettes d'architecture en France: actes de colloque*. Paris, France. p. 14-18.

LUDWIG, Marcel, HERBST, Gerd, RIEKE-ZAPP, Dirk, ROSENBAUER, Ralph, RUTISHAUSER, Susanne et ZELLWEGER, Albin, 2013. The Advantages of Parametric Modeling for the Reconstruction of Historic Buildings. The Example of the In War Destroyed Church of St. Catherine (Katharinenkirche) in Nuremberg. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1, 2013* [en ligne]. Trente, Italie. p. 161-165. [Consulté le 30 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W1/161/2013/isprsarchives-XL-5-W1-161-2013.html>.

LURÇAT, André, 1953. *Formes, composition et lois d'harmonie: éléments d'une science de l'esthétique architecturale*. Paris : Vincent et Fréal.

LYNN, John Albert, 2010. *Les guerres de Louis XIV: 1667-1714*. Paris, France : Perrin.

MADELEINE, Sophie et FLEURY, Philippe, 2011. Le « Plan de Rome » de Paul Bigot à l'Université de Caen et son double virtuel : de l'objet patrimonial à l'outil scientifique. In : *In Situ. Revue des patrimoines* [en ligne]. n° 17. [Consulté le 14 avril 2013]. Disponible à l'adresse : <http://insitu.revues.org/840>.

MAISON DE L'HISTOIRE DE FRANCE, 2012. *Présentation de l'exposition « La France en relief »* [en ligne]. Grand Palais : 26 janvier 2012. [Consulté le 15 mai 2012]. Disponible à l'adresse : http://www.youtube.com/watch?v=l8o5fGdrn1U&feature=youtube_gdata_player.

MANESSON MALLET, Allain, 1691. *Les Travaux De Mars Ou L'Art De La Guerre, Divisez En Trois Parties. Enseigne la Methode de fortifier toutes sortes de Places Regulieres & Irregulieres* [en ligne]. Paris, France : Denys Thierry. [Consulté le 10 janvier 2011]. Disponible à l'adresse : <http://books.google.fr/books?id=Kvg9AAAACAAJ&pg=PP9#v=onepage&q&f=false>.

MANESSON MALLET, Allain, 1696. *Les Travaux De Mars Ou L'Art De La Guerre, Divisez En Trois Parties. Enseigne la Methode de fortifier toutes sortes de Places Regulieres & Irregulieres* [en ligne]. Amsterdam, Pays-Bas : Henry Desbordes. [Consulté le 4 janvier 2011]. Disponible à l'adresse : <http://books.google.fr/ebooks?id=J6w6AAAACAAJ&printsec=frontcover&output=reader>.

MANFERDINI, Anna Maria et GALASSI, Mark, 2013. Assessments for 3d Reconstructions of Cultural Heritage Using Digital Technologies. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1* [en ligne]. Trente, Italie. p. 167-174. [Consulté le 24 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W1/167/2013/isprsarchives-XL-5-W1-167-2013.pdf>.

MAP, 2007. 3D Monuments - Programme national de numérisation 3D du patrimoine. 2007. [Consulté le 3 août 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.map.archi.fr/3D-monuments/>.

MARTIN, Philippe et LEMAÎTRE, Pascal, 2007. *La route des fortifications dans l'est*. Paris, France : Huitième jour. Les étoiles de Vauban.

MAZIÈRES, François de, 2011. *Le relevé en architecture ou l'éternelle quête du vrai: journées internationales d'études 5 et 6 novembre 2007, Cité de l'Architecture & du Patrimoine; [actes du Colloque Le Relevé en Architecture ou l'Éternelle Quête du Vrai]*. Lyon, France : Éditions Lieux Dits.

MELOT, Michel, 1999. Le monument à l'épreuve du patrimoine. In : *La confusion des monuments*. Vol. 7, p. 7-19.

MELOT, Michel, 2005. Quand la culture cède la place au patrimoine. In : *Reinventer le patrimoine: de la culture à l'économie, une nouvelle pensée du patrimoine?* Paris, France : L'Harmattan. Collection Gestion de la culture et du secteur non lucratif.

MELOT, Michel, 2012. *Michel Melot: «le patrimoine est plus vaste que l'art»* [en ligne]. Journal en ligne. [Consulté le 16 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.lefigaro.fr/culture/2012/07/01/03004-20120701ARTFIG00148-michel-melot-le-patrimoine-est-plus-vaste-que-l-art.php>.

MERLO, A., SÁNCHEZ BELENGUER, C., VENDRELL VIDAL, E., FANTINI, F. et ALIPERTA, A., 2013. 3D Model Visualization Enhancements in Real-Time Game Engines. In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1* [en ligne]. Trente, Italie. p. 181-188. [Consulté le 11 avril 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W1/181/2013/isprsarchives-XL-5-W1-181-2013.html>.

MIGNARD, Clément, NICOLLE, Christophe et GESQUIÈRE, Gilles, 2012. *SIGA3D: modélisation, échange et visualisation d'objets 3D du bâtiment et d'objets urbains géoréférencés; application aux IFC pour la gestion technique de patrimoine immobilier et urbain*. Dijon Le Creusot, France.

MILLS, Jon et ANDREWS, David, 2011. *3D Laser Scanning for Heritage (second edition): Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture* [en ligne]. English Heritage. Disponible à l'adresse : http://www.english-heritage.org.uk/content/publications/publicationsNew/guidelines-standards/3d-laser-scanning-heritage2/3D_Laser_Scanning_final_low-res.pdf.

MISSION DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE, 2008. Numérisation du patrimoine culturel. In : *Culture & Recherche*. n° 118 - 119.

MMLAB, 2011. Building Information Modeling. In : *Organon: MMLab's Semantic Web activities* *Organon: MMLab's Semantic Web activities* [en ligne]. [Consulté le 1 juillet 2011]. Disponible à l'adresse : <http://multimedialab.elis.ugent.be/organon/ifc>.

MONTARD, Nicolas, 2012. Partenariat INA/DailyNord : Pierre Mauroy ou l'obsession du plan-relief. DailyNord. [Consulté le 3 juin 2012]. Disponible à l'adresse : <http://dailynord.fr/2012/01/ina-mauroy-plan-relief/>.

MORTARA, Michela, CATALANO, Chiara Eva, BELLOTTI, Francesco, FIUCCI, Giusy, HOURS-PANCHETTI, Minica et PETRIDIS, Panagiotis, 2013. Learning cultural heritage by serious games. In : *Journal of Cultural Heritage* [en ligne]. [Consulté le 7 août 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207413001349>.

MÜLLER, Pascal, ZENG, Gang, WONKA, Peter et VAN GOOL, Luc, 2007. Image-based Procedural Modeling of Facade. In : *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007*.

MURPHY, Maurice, MCGOVERN, Eugene et PAVIA, Sara, 2007. Parametric Vector Modelling of Laser and Image Surveys of 17th Century Classical Architecture in Dublin. In : *8th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST* [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/project_2006_.pdf.

MURPHY, Maurice, MCGOVERN, Eugene et PAVIA, Sara, 2013. Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [en ligne]. Trente, Italie : Fabio Remondino, Sabry El-Hakim. [Consulté le 30 mai 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271612002079>.

MUSÉE D'HISTOIRE DE NANTES, 2013. Projet « Nantes1900 ». [Consulté le 31 mai 2013]. Disponible à l'adresse : <http://nantes1900.chateau-nantes.fr/>.

MUSÉE DE LA COUR D'OR, [sans date]. *Plaquette de présentation aux musées de la Cour d'Or de la réplique du plan-relief*.

MUSÉES DES PLANS-RELIEFS, 2011. Site du Musées des Plans-Reliefs. [Consulté le 2 mai 2011]. Disponible à l'adresse : <http://www.museedesplansreliefs.culture.fr>.

NAEGEL, Paul, 2012. Modèles et réalité - Le cas du port de Nantes. [Consulté le 2 juin 2013]. Disponible à l'adresse : <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00665572>.

NAGEL, Claus, STADLER, Alexandra et KOLBE, Thomas H., 2009. Conceptual requirements for the automatic reconstruction of building information models from uninterpreted 3D models. In : *Academic Track of Geoweb 2009 Conference* [en ligne]. Vancouver, Canada. p. 46-53. [Consulté le 20 septembre 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.citygml.org/typo3-igg/fileadmin/user_upload/Stadler/Nagel_Stadler_Kolbe_Geoweb2009_final.pdf.

NAZARIAN, Bruno, 2013. *Chapitre VII: Courbes et surfaces de forme libre* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://bnazarian.free.fr/>.

NEBIKER, Stephan, BARMETTLER, Andreas, FISCHER, Beat et WEBER, Erich, 2009. Vom physischen Stadtmodell zum interaktiven 3D-GIS - Anforderungen und Lösungsansätze am Beispiel der historischen Stadt Solothurn. In : *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*. Vol. 2009, n° 3, p. 209-219.

NEXTENGINE, 2013. NextEngine 3D Laser Scanner. In : *NextEngine* [en ligne]. [Consulté le 31 décembre 2011]. Disponible à l'adresse : <http://www.nextengine.com/>.

NIEDERÖST, Jana, 2001. 3D reconstruction and accuracy analysis of historical relief models. In : *International Seminar on Development in Digital Photogrammetry*. Gifu, Japan : Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Geodesy and Photogrammetry.

NIEDERÖST, Jana, 2002. Landscape as a historical object: 3D reconstruction and evaluation of a relief model from the 18th century. In : *International Workshop on Visualization and Animation of Landscape*. Kunming, China : Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Geodesy and Photogrammetry.

NOY, Natalya F. et MCGUINNESS, Deborah L., 2001. *Développement d'une ontologie 101: Guide pour la création de votre première ontologie*. Stanford, Californie, États-Unis : Université de Stanford.

NUCHTER, Andreas, SURMANN, Hartmut et HERTZBERG, Joachim, 2003. Automatic model refinement for 3D reconstruction with mobile robots. In : *3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. Proceedings. Fourth International Conference on*. p. 394-401.

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM, 2009. GML Application Schemas and Profiles | OGC Network. [Consulté le 5 juillet 2011]. Disponible à l'adresse : <http://www.ogcnetwork.net/node/210>.

ORGEIX, Émilie d', 2008. Alain Manesson Mallet : Portrait d'un ingénieur militaire dans le sillage de Vauban. In : *Le Monde des cartes*. n° 195, p. 67-74.

ORGEIX, Émilie d', 2009a. Fortifications et traités d'architecture militaire français (XVIIe-XVIIIe siècles). In : *Les Nouvelles de l'INHA*. n° 35, p. 7-9.

ORGEIX, Émilie d', 2009b. *Traité et manuels pratiques d'architecture militaire publiés en France (1601-1748). Projet de catalogue raisonné et d'étude*.

ORGEIX, Émilie d', SANGER, Victoria, VIROL, Michèle, WARMOES, Isabelle et FAUCHERRE, Nicolas, 2007. *Vauban : la pierre et la plume*. Paris; Luxembourg : Éditions du Patrimoine; Klopp.

PAUWELS, Pieter, DE MEYER, Ronald et VAN CAMPENHOUT, Jan, 2010. Visualisation of semantic architectural information within a game engine environment. In : *Proceedings of the 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*. Sendai, Miyagi, Japan. p. 219 - 228.

PAUWELS, Pieter, VERSTRAETEN, Ruben, DE MEYER, Ronald et VAN CAMPENHOUT, Jan, 2008. Architectural Information Modelling for Virtual Heritage Application. In : *Digital Heritage—Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*. Limassol, Chypre : Marinos Ioannides. p. 18-23.

PAVLIDIS, George, TSIAFAKIS, Despoina, KOUTSOUDIS, Anestis, ARNAOUTOGLU, Fotarny, TSIUKAS, Vassilis et CHAMZAS, Christodoulos, 2006. Recording cultural heritage. In : *Proceedings of Third International Conference of Museology*. Mytilène, Grèce.

PEARSON, Alastair William, SCHAEFER, Martin et JENNY, Bernhard, 2009. A Cartometric Analysis of the Terrain Models of Joachim Eugen Müller (1752–1833) Using Non-contact 3D Digitizing and Visualization Techniques. In : *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. Vol. 44, n° 2, p. 111-120.

PERNOT, Jean-François, 1982. Une importante contribution à la connaissance des ingénieurs d'Ancien Régime. In : *Revue d'histoire des sciences*. Vol. 35, n° 3, p. 275-280.

- PÉROUSE DE MONTCLOS, Jean-Marie, 1998. Observation sur la viabilité et la fiabilité des maquettes. In : *Maquettes d'architecture*. Paris, France : Éd. du Patrimoine.
- PÉROUSE DE MONTCLOS, Jean-Marie, 2011. *Architecture : description et vocabulaire méthodiques*. Paris : Éd. du Patrimoine, Centre des monuments nationaux.
- PFEIFFER, Michelle, CARRÉ, Cyril, DELFOSSE, Vincent et BILLEN, Vincent, 2013. Virtual Leodium: From an historical 3D city scale model to an archaeological information system. In : *5th Belgian Geographical Day*. Louvain-la-Neuve, Belgique.
- PIATTI, Dario, REMONDINO, Fabio et STOPPA, David, 2013. State-of-the-Art of TOF Range-Imaging Sensors. In : REMONDINO, Fabio et STOPPA, David (éd.), *TOF Range-Imaging Cameras* [en ligne]. Springer Berlin Heidelberg. p. 1-9. [Consulté le 25 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/bases-doc.univ-lorraine.fr/chapter/10.1007/978-3-642-27523-4_1.
- PIDCOCK, Woody, 2013. What are the differences between a vocabulary, a taxonomy, a thesaurus, an ontology, and a meta-model? In : *Info Grid: The Web Graph Database* [en ligne]. [Consulté le 31 juillet 2012]. Disponible à l'adresse : <http://infogrid.org/trac/wiki/Reference/PidcockArticle>.
- PIERACCINI, Massimiliano, GUIDI, Gabriele et ATZENI, Carlo, 2001. 3D digitizing of cultural heritage. In : *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 2, n° 1, p. 63-70.
- PIERRE, Jodogne, 1992. Les traités d'architecture de la Renaissance. Actes du colloque tenu à Tours du 1er au 11 juillet 198. Études réunies par Jean Guillaume. In : *Revue belge de philologie et d'histoire*. Vol. 70, n° 4, p. 1033-1034.
- POLONOVSKI, Max, 1998. Les plans-reliefs entre perfectionnisme et imprécision. In : *Monumental*. n° 21, p. 32 - 39.
- POLONOVSKI, Max, DEROO, Eric et WARMOES, Isabelle, 2012. *La France en relief. Chefs-d'oeuvre de la collection des plans-reliefs de Louis XIV à Napoléon III*. Rmn-Grand Palais.
- PROST, Philippe, 1999. La restauration de la citadelle de Belle-Ile-en-Mer. In : *L'Architecture militaire*. Centre des monuments nationaux. Monumental, 8. p. 62-83.
- PU, Shi et VOSELMAN, George, 2009. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 64, n° 6, p. 575-584.
- REMONDINO, Fabio, 2011. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. In : *Remote Sensing*. Vol. 3, n° 6, p. 1104-1138.
- REMONDINO, Fabio, DEL PIZZO, Silvio, KERSTEN, Thomas P. et TROISI, Salvatore, 2012. Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation - A Critical Overview. In : *Proceedings of EuroMed 2010, 8th Digital Heritage*. Limassol, Chypre. p. 40-54.
- REMONDINO, Fabio et MENNA, Fabio, 2008. Image-based surface measurement for close-range heritage documentation. In : *The ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China*. Vol. 37, p. 199-206.
- RÉSEAU VAUBAN, 2012. Les fortifications de Vauban - Patrimoine Mondial de l'UNESCO. 2012. [Consulté le 5 avril 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.sites-vauban.org/?lang=fr>.

RIPOCHE, Caroline, 2012. *Contribution à l'élaboration de méthodes de restitution archéologique par photogrammétrie – Application au monastère de Saint-Hilarion, Gaza*. [en ligne]. mémoire. INSA de Strasbourg. Disponible à l'adresse : http://eprints2.insa-strasbourg.fr/1209/1/Caroline_Ripoche_PFE2012.pdf.

ROCOLLE, Pierre, 2008. *2000 ans de fortification française : du 4e siècle avant Jésus-Christ au mur de l'Atlantique*. Panazol, France : Lavauzelle.

ROLLIER-HANSELMANN, Juliette, PETTY, Zoé, MAZUIR, Alexandre, FAUCHER, Sebastien, GANAY, Osmond De, COULAIS, Jean-François et ROLLIER, Gilles, 2012. Développement d'un SIG 4D pour la ville médiévale de Cluny. In : *3° Journées d'Informatique et Archéologie* [en ligne]. Paris, France. Disponible à l'adresse : <http://jiap2012.sciencesconf.org/file/11207>.

SAILHAN, Pierre, 1991. *La fortification : histoire et dictionnaire : cartes de France des ouvrages fortifiés*. Paris, France : Tallandier.

SAINT-AUBIN, Jean-Paul, 1992. *Le relevé et la représentation de l'architecture*. Paris : Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France. Documents & méthodes, no. 2.

SAMOA, 2013. Comment faire parler une maquette ? [Consulté le 12 août 2013]. Disponible à l'adresse : <http://creationduquartier.com/fr/webzine/comment-faire-parler-une-maquette>.

SANGOUARD, Thierry, 2011. Projet relief Auguste Magnin P.R.A.M. Conférence de presse. Genève. 2011. [Consulté le 2 mai 2011]. Disponible à l'adresse : http://www.ville-geneve.ch/fileadmin/public/Departement_3/Documents_d_actualite/relief-magnin-presentation-spatial.pdf.

SCHILLING, Alexander, 2007. *Maquettes d'architecture*. Bâle, Suisse : Birkhäuser - Ed. d'architecture.

SCHINKO, Christoph, STROBL, Martin, ULLRICH, Torsten et FELLNER, Dieter, 2010. Modeling Procedural Knowledge: A Generative Modeler for Cultural Heritage. In : *Proceedings of EuroMed 2010, 8th Digital Heritage*. Limassol, Chypre. p. 153-165.

SCHWEIBENZ, Werner, 2004. L'évolution du musée virtuel. In : *Les Nouvelles de l'ICOM* [en ligne]. n° 3. Disponible à l'adresse : http://icom.museum/fileadmin/user_upload/pdf/ICOM_News/2004-3/FRE/p3_2004-3.pdf.

SEDLACEK, David et ZARA, J., 2011. The Langweil Model of Prague - a Challenge for State-of-the-art 3D Reconstruction Techniques. In : *EG 2011 - Posters* [en ligne]. Llandudno, Royaume-Uni : Eurographics Association. p. 5-6. Disponible à l'adresse : <http://diglib.org/EG/DL/conf/EG2011/posters/005-006.pdf>.

SEDLACEK, David et ZARA, Jiri, 2009. Graph Cut Based Point-Cloud Segmentation for Polygonal Reconstruction. In : *Proceedings of Advances in Visual Computing* [en ligne]. Berlin, Allemagne. p. 218-227. Disponible à l'adresse : <http://www.springerlink.com/index/K7H5758883213U97.pdf>.

SIGLER, Kellie, 2012. eye3. [Consulté le 1 février 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.kickstarter.com/projects/eye3/eye3>.

SKARLATOS, Dimitrios et KIPARISSI, Stavroula, 2012. Comparison of Laser Scanning, Photogrammetry and SFM-MVS Pipeline Applied in Structures and Artificial Surfaces. In : *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, 2012* [en ligne]. Melbourne, Australie. p. 299-304. [Consulté le 12 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/I-3/299/2012/isprsannals-I-3-299-2012.pdf>.

TALLON, Andrew et TIMBERT, Arnaud, 2011. Le bâtiment gothique relevé par laser. Le cas de la cathédrale Notre-Dame de Noyon et la question de son contrebutement : première approche. In : *Arch-I-Tech 2010 : Actes du colloque Cluny*. Bordeaux, France : Ausonius Éditions.

TEPAVČEVIĆ, Bojan et STOJAKOVIĆ, Vesna, 2012. Shape grammar in contemporary architectural theory and design. In : *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*. Vol. 10, n° 2, p. 169–178.

THOENES, Christof, 2003. Introduction. In : EVERS, Bernd, BIERMANN, Veronica, KLEIN BORNGÄSSER, Barbara, FREIGANG, Christian, GRÖNERT, Alexander, JOBST, Christoph, KREMEIER, Jarl, LUPFER, Gilbert, PAUL, Jürgen, RUHL, Carsten, SIGEL, Paul, STEWERING, Roswitha et ZIMMER, Jürgen, *Théorie de l'architecture : de la Renaissance à nos jours : 117 traités présentés dans 89 études*. Köln, Allemagne : Taschen. p. 576.

TROCHON, Marie-Laure, 2012. *Analyse des méthodes photogrammétriques de corrélation d'images pour l'étude des ouvrages rocheux*. [en ligne]. INSA de Strasbourg. [Consulté le 26 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://eprints2.insa-strasbourg.fr/1220/>.

TSICHRITZIS, Dennis et GIBBS, Simon J., 1991. Virtual Museums and Virtual Realities. In : *Proceedings of the International Conference on Hypermedia and Interactivity in Museums* [en ligne]. p. 17–25. [Consulté le 14 août 2013]. Disponible à l'adresse : <http://files.museusdigitais21.webnode.com/200000085-eca4aed9e3/virtual%20museums%20and%20virtual%20realities.pdf>.

ULG, 2011. *Les prémices d'un Liège en 3D* [en ligne]. [Consulté le 14 septembre 2012]. Disponible à l'adresse : http://www.ulg.ac.be/cms/c_1255281/les-premices-d-un-liege-en-3d.

ULLRICH, Torsten, SCHINKO, Christoph, SCHIFFER, Thomas et FELLNER, Dieter W., 2013. Procedural descriptions for analyzing digitized artifacts. In : *Applied Geomatics*. p. 1–8.

UNESCO, 1972. *Convention concernant la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel* [en ligne]. [Consulté le 3 août 2012]. Disponible à l'adresse : <http://whc.unesco.org/fr/conventiontexte>.

UNESCO, 2003. *Définitions* [en ligne]. [Consulté le 15 septembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00716690/>.

UNIVERSITÉ PARIS DESCARTES, 2013. Thésaurus - Wiki Paris Descartes. In : *Wiki Paris Descartes* [en ligne]. [Consulté le 30 juin 2011]. Disponible à l'adresse : <http://wiki.univ-paris5.fr/wiki/Th%C3%A9saurus>.

VALLET, Odon, 1999. Les mots du monument. In : *La confusion des monuments*. Vol. 7, p. 21–23.

VÁRADY, Tamás, MARTIN, Ralph R et COX, Jordan, 1997. Reverse engineering of geometric models - an introduction. In : *Computer-Aided Design*. Vol. 29, n° 4, p. 255–268.

VIGNOLA, 1642. *Regola delli cinque ordini d'Architettura*. Amsterdam, Johannes Janssonius

VILLE DE ST OMER, 2013. *Outils numériques de valorisation du patrimoine de la ville Programme 2013* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://services-informatiques.avidemarche.com/2013/06/28/outils-numeriques-de-valorisation-du-patrimoine-de-la-ville-programme-2013/>.

VIROL, Michèle, 2003. *Vauban : de la gloire du roi au service d'état*. Seyssel, France : Champ Vallon.

WACHOWIAK, Melvin J. et KARAS, Basiliki Vicky, 2009. 3D scanning and replication for Museum and Cultural Heritage Applications. In : *Journal of the American Institute for Conservation*. Vol. 48, n° 2, p. 141–158.

WARMOES, Isabelle, 2008. La rationalisation de la production cartographique à grande échelle au temps de Vauban. In : *Le monde des cartes*. n° 195, p. 55–66.

WARMOES, Isabelle, 2012. *Le musée des plans-reliefs : maquettes historiques de villes fortifiées*. Paris, France : Éd. du Patrimoine.

WATT, Alan H., 2000. *3D computer graphics*. 3rd ed. Harlow, Angleterre ; Reading, Mass : Addison-Wesley.

WEIK, Sebastian et GRAU, Oliver, 1996. Recovering 3-D object geometry using a generic constraint description. In : *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vienne, Autriche. p. 593–598.

WHITE, Chris, 2006. King Kong: The Building of 1933 New York City. In : *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches* [en ligne]. New York, États-Unis : ACM. [Consulté le 17 décembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://doi.acm.org/10.1145/1179849.1179969>.

WINKELBACH, Simon, 2011. *Interview : Simon Winkelbach, DAVID Laserscanner* [en ligne]. 3DVF. [Consulté le 16 septembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.3dvf.com/dossier-770-5-interview-simon-winkelbach-david-laserscanner.html>.

WOODBURY, Robert, 2010. *Elements of parametric design*. London; New York : Routledge.

ZEROUAL, Ibrahim, LIAZID, Abdelkrim et GRUSSENMEYER, Pierre, 2011. Expériences de photogrammétrie rapprochée par Corrélation épipolaire dense. In : *XYZ*. n° 127, p. 33-41.

Index

- Acquisition tridimensionnelle, 1, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38, 44, 60, 65, 67, 69, 71, 77, 79, 81, 87, 100, 103, 105, 107, 108, 109, 110, 112, 114, 138, 170, 207, 208, 210, 213, 214, 225, 286, 287, 292, 293, 294, 306
- Fortification bastionnée, 1, 8, 12, 14, 21, 73, 74, 75, 80, 82, 87, 89, 92, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 108, 111, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 123, 124, 130, 131, 132, 134, 135, 138, 139, 140, 144, 149, 166, 173, 174, 176, 177, 183, 192, 201, 202, 203, 208, 209, 258, 259, 269, 271, 287, 288, 289, 290, 294, 295, 298, 299, 302, 306
- Logiciels de modélisation architecturale
- Abvent Archicad, 52, 58
 - Autodesk Revit, 49, 50, 52, 213, 252, 292, 299
- Logiciels de modélisation géométrique
- Autodesk 3DS, 83
 - Autodesk Maya, 51, 70, 83, 222
 - Grasshopper, 8, 14, 52, 53, 87, 102, 103, 104, 105, 140, 141, 142, 143, 144, 149, 150, 166, 167, 170, 177, 188, 199, 202, 209, 215, 251, 288, 293, 294, 296, 299, 306
 - Mc Neel Rhinoceros, 52, 140, 141
- Logiciels de photogrammétrie
- Autodesk 123D Catch, 38, 112, 113, 114, 295
 - Autodesk ImageModeler, 74
 - Eos Systems PhotoModeler, 38, 39, 110
- Logiciels de traitements de données 3D
- Geomagic, 47, 49, 170, 171, 172, 292, 297
 - Rapidform, 47, 170
- Maquette, 1, 7, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 40, 41, 42, 43, 54, 58, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 89, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 107, 108, 109, 110, 113, 114, 126, 193, 194, 195, 207, 209, 213, 214, 217, 218, 220, 224, 228, 229, 231, 253, 260, 262, 266, 286, 287, 292, 293, 294, 295, 299, 302, 306
- Modèle de connaissance, 1, 14, 45, 46, 53, 55, 56, 70, 101, 102, 130, 138, 139, 202, 203, 208, 209, 210, 258, 288, 289
- Ontologie, 56, 57, 58, 59, 214, 220, 286
 - Thésaurus, 56, 217, 230, 235
- Modélisation paramétrique, 1, 7, 11, 12, 13, 46, 47, 50, 51, 52, 55, 61, 140, 208, 213, 215, 286, 292, 306
- modélisation procédurale, 51, 53, 54, 59, 68, 286
- Photogrammétrie, 1, 7, 13, 17, 28, 29, 30, 31, 32, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 44, 60, 74, 81, 83, 84, 99, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 221, 222, 229, 231, 286, 292, 294, 295
- Plan-reliefs, 1, 2, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 40, 41, 48, 63, 64, 73, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 102, 103, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 118, 119, 121, 122, 126, 129, 138, 139, 144, 157, 158, 160, 163, 168, 169, 170, 171, 177, 190, 191, 192, 201, 203, 204, 207, 208, 209, 210, 213, 214, 216, 217, 222, 223, 224, 226, 228, 231, 253, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 286, 287, 288, 289, 290, 292, 293, 294, 295, 297, 298, 299, 300, 302, 306
- Reconstruction, 1, 2, 8, 11, 12, 13, 14, 32, 38, 40, 45, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 63, 64, 65, 66, 68, 69, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 99, 100, 102, 103, 104, 105, 110, 111, 114, 115, 138, 139, 140, 145, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 176, 192, 193, 199, 201, 202, 203, 208, 209, 214, 215, 216, 218, 219, 220, 221, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 270, 286, 287, 288, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 302, 306
- Restitution, 1, 24, 25, 26, 37, 63, 64, 65, 66, 67, 78, 79, 80, 83, 84, 110, 114, 207, 209, 220, 222, 229, 266, 287, 293, 306
- Rétroconception, 1, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 44, 45, 46, 47, 51, 55, 59, 60, 61, 84, 97, 100, 102, 104, 122, 138, 145, 169, 204, 208, 209, 286, 287, 292, 306
- Segmentation
- Segmentation géométrique, 1, 48, 170, 173, 286

Segmentation sémantique, 1, 12, 45, 49, 102, 104,
105, 139, 144, 169, 173, 176, 178, 190, 208, 286,
288, 294, 296, 302

Système d'information, 25, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 69, 70,
74, 82, 97, 210, 219, 306

BIM, 50, 52, 56, 57, 58, 59, 60, 214, 215, 216, 219, 286

GIS, 47, 56, 58, 61, 70, 73, 83, 84, 192, 226, 229, 286,
292, 293

Modèle de données, 56, 57, 58, 60, 61, 70, 219, 225,
293

Technologies de l'information et de la communication,
11, 24, 25, 59, 97, 207, 210

Annexe

1) Lexique

Le lexique s'appuie en grande partie sur le Thésaurus de L'architecture (Chatenet et al., 2000) dont de nombreuses définitions sont issues de l'ouvrage de Jean-Marie Pérouse de Monclos : Architecture : Méthode Et Vocabulaire (Pérouse De Montclos, 2000). Parmi les nombreuses sources de ce dernier livre, on peut citer le Dictionnaire Portatif de L'ingénieur (Belidor, 1755) pour le chapitre traitant de l'architecture militaire. L'ouvrage Places fortes, bastion du pouvoir (Faucherre, François, 1996) est également l'une des références utilisées pour la constitution de ce lexique.

a) Ensembles fortifiés

Ensemble militaire formé d'édifices ou d'ouvrages défensifs.

- Place forte – Espace entouré par des fortifications et formant un ensemble indépendant.
- Fort (détaché) – Petite place forte contenant une garnison, servant d'appui dans le système de défense d'une frontière ou d'une ville dont il constitue un ouvrage du dehors.
- Forteresse – Place forte dont la fonction est strictement militaire.
- Citadelle – Fort ou forteresse commandant une ville, souvent placé à cheval sur son enceinte plus rarement à l'intérieur de celle-ci. Elle sert habituellement de réduit ; elle a quelquefois pour fonction de surveiller la ville elle-même et d'y réprimer les subversions internes. Elle peut aussi abriter un quartier de la ville.

b) Ouvrages fortifiés

Construction fortifiée autonome, non habitable, isolée ou incluse dans un édifice ou un ensemble fortifié.

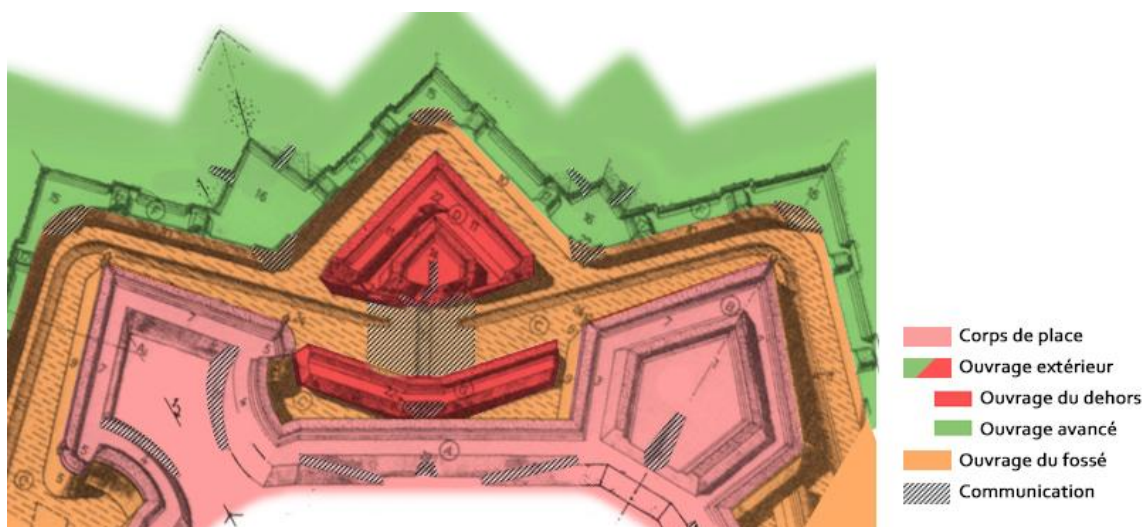


Figure 138. Principaux groupes d'ouvrages fortifiés.
D'après : S. François, 1985

i) Communications

▪ Caponnière (de liaison) ou double caponnière – Ouvrage défilant un chemin situé derrière un double parapet en glacis qui peut être rendu défensif par une banquette d'infanterie, construit au fond et au travers d'un fossé sec vis-à-vis le milieu d'un front bastionné du corps de place ou d'une tenaille et permettant la communication entre le corps de place et un ouvrage du dehors (Figure 139).

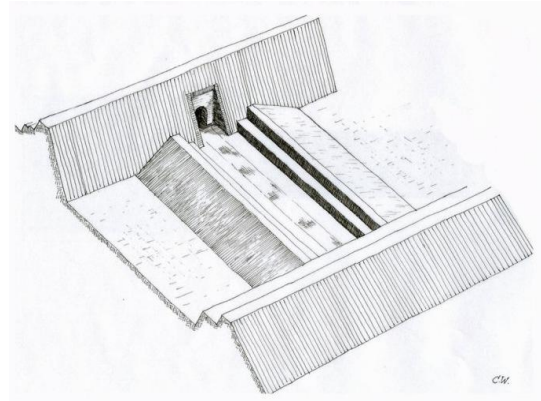


Figure 139. Double caponnière.

▪ Demi-caponnière ou aileron (synonyme d'aile) – Demi-caponnière ou caponnière simple flanquant un seul fossé.

▪ Pas de souris – Escalier étroit permettant de gravir la gorge d'une demi-lune ou la contrescarpe d'un fossé, pour accéder au chemin couvert. La marche inférieure est à 1,5 mètre du fond du fossé pour conserver la valeur de l'obstacle.

▪ Poterne – Petite porte placée dans le bas des courtines ou dans le revers des orillons, au niveau des fossés.

▪ Rampe – Terrassement permettant le cheminement des hommes et de l'artillerie sur les talus du rempart ou sur les cavaliers.

▪ Rue militaire ou rue du rempart – Portion de terrain naturel réservée au pied du rempart et le séparant des constructions civiles.

▪ Sillon ou chemin de terre – Chemin qui coupe un fossé en deux parties.

▪ Sortie de chemin couvert – Rampe douce aménagée dans le parapet du chemin couvert pour permettre de se rendre à l'extérieur sur le glacis.

ii) Corps de place

Enceinte formée par une levée de terre dont la poussée peut être retenue par un mur de soutènement.

(1) Bastions

Ouvrage pentagonal faisant avant-corps sur une enceinte. Par extension, on parle également de bastion sur les ouvrages à cornes formés de demi-bastion et de bastion (bastion de la couronne par exemple). Le bastion est régulier lorsque ses faces et ses flancs sont égaux entre eux. En l'absence d'une face, on parle de demi-bastion ou d'avancé de rempart. On peut également distinguer les bastions :

▪ Bastion plein ou retranché à la gorge – Ouvrage rempli par le terre-plein du rempart (Figure 140).

- Bastion vide ou ouvert à la gorge– Ouvrage qui n'est pas fermé du côté de l'intérieur. Si l'ennemi s'en empare, il ne peut pas s'y retrancher. Terrassé seulement le long des parapets sur une certaine largeur seulement (Figure 140).



Figure 140. Bastion plein (haut) et ouvert (bas).

En fonction de la géométrie de sa gorge, le bastion peut être un :

- Bastion camus – Bastion construit sur un angle rentrant. Quand les deux faces ne sont qu'une seule ligne, on lui donne le nom de plate-forme.
- Bastion composé – Bastion dont les demi-gorges ont des longueurs différentes.
- Bastion difforme – Bastion dont la gorge est une ligne droite.
- Bastion plat – Bastion situé sur un côté, et non sur l'angle d'une enceinte.

La géométrie de ses flancs permet de distinguer le :

- Bastion à flancs brisés – Bastion dont les flancs sont en angle rentrant.
- Bastion à flancs couverts – Bastion protégés par des orillons.
- Bastion à flancs étagés – Bastion formé de terrasses à ciel ouvert.
- Bastion à tenaille ou coupé – Bastion dont l'angle flanqué est coupé en angle rentrant (Figure 141).
- Bastion avec un flanc décroché – Bastion découpé en fraction de faces.

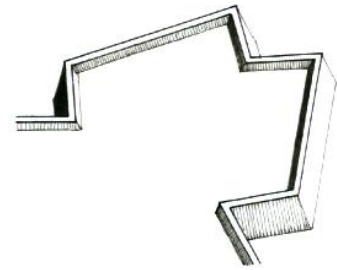


Figure 141. Bastion à tenaille.

Dans ce qui est qualifié de deuxième et troisième système de Vauban, le bastion est divisé en deux entités.

- Bastion détaché – Grande contre-garde placée devant un bastion peu développé en plan nommé tour bastionnée (Figure 142, B).
- Tour bastionnée – Bastion peu développé en plan devant lequel se trouve un bastion détaché (Figure 142, A).

(2) Courtines

Pan de muraille compris entre deux bastions.

- Courtine bastionnée – Courtine reprenant le tracé du front bastionné. Ouvrage mis en œuvre dans le troisième système de Vauban (Figure 142, C).
- Courtine retirée – Portion de courtine prolongeant l'axe de la ligne de défense dans un flanc à orillon.

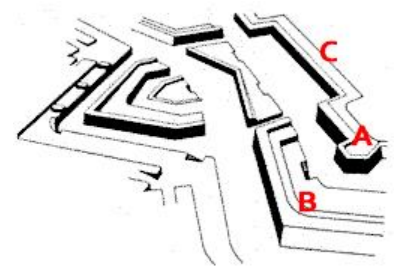


Figure 142. Une tour bastionnée (A) et son bastion détaché (B).

iii) Ouvrages du fossé

- Batardeau – Digue en maçonnerie limitant la partie en eau d'un fossé.
- Contrescarpe – Paroi d'un fossé du côté de l'assaut.
- Coursière d'escarpe – Coursière ménagée dans le massif de l'escarpe.
- Coursière de fusillade – Coursière percée d'ouvertures sur le fossé.
- Coursière de contrescarpe – Coursière ménagée dans le massif de la contrescarpe, ou de la contrescarpe.
- Cunette ou cuvette – Canal établi au fond d'un fossé sec pour drainer les eaux pluviales, pouvant ménager un obstacle supplémentaire.
- Dame – Obstacle massif en forme de tourelle pleine, posée sur la faite d'un batardeau pour empêcher que celui-ci ne serve de cheminement à l'assiégeant.
- Escarpe – Paroi d'un fossé du côté de la place.
 - Escarpe attachée – Mur d'escarpe entièrement réparé.
 - Escarpe demi-détachée – Partie haute du mur d'escarpe forme parapet devant un chemin de ronde ;
 - Escarpe détachée – le talus en terre est séparé du mur.
- Fossé – Obstacle constitué par une tranchée : son profil est donc sous le niveau du terrain.
- Fossé diamant – Petit fossé établi au pied d'un ouvrage et servant à recevoir les parties hautes descendues par le tir de l'ennemi pour éviter que celles-ci n'obstruent les meurtrières.

iv) Ouvrages extérieurs

Terrain entièrement environné de fossés, mais qui n'est fortifié ou couvert de rempart ou de parapet que du côté de la campagne. On y distingue les ouvrages du dehors et les ouvrages avancés.

(1) Ouvrages du dehors

Tous les ouvrages extérieurs qui, sans être rattachés au corps de place, sont construits dans le fossé.

- Contre-garde – Ouvrage extérieur bas, couvrant à distance les faces d'un bastion ou celles de tout autre ouvrage. Elle a généralement la même forme que le redan.
- Demi-lune ou ravelin – Ouvrage retranché placé devant la courtine ou à la pointe du bastion (on l'appelle alors ravelin) et entièrement cerné de fossés. Confondu aussi avec ravelin (Manesson Mallet, 1696 ; 56).
 - Demi-lune à flanc – Demi-lune qui possède des flancs à l'image du bastion.
- Grande lunette avec retranchement
- Fer-à-Cheval ou Pâté – Ouvrage de figure ronde ou ovale, situé dans la zone pouvant être inondée, mais relié à la place par un chemin insubmersible.

- Ouvrage à corne – Défense avancée destinée à occuper un terrain voisin des remparts dont l’occupation par les assaillants pouvait mettre en danger la place.

- Ouvrage à corne (simple) – Ouvrage dont la tête est fortifiée de deux demi-bastions joints par une courtine avec des ailes parallèles (Figure 144, B).
- Ouvrage à corne à (double) flanc – Ouvrage dont la tête est fortifiée comme un ouvrage à corne, mais avec deux flancs sur les ailes formant un angle au milieu de courtine (Figure 144, D).
- Ouvrage à couronne (simple) – Ouvrage formé par un bastion qui est la tête reliée de part et d’autre par deux courtines à deux demi-bastions (Figure 144, A). Il peut couvrir la tête d’un ouvrage à couronne dans le cas d’ouvrage à corne couronnée (Figure 144, C).
- Ouvrage à double couronne – Ouvrage à couronne à trois fronts bastionnés.

- Ouvrage à tenaille – Ouvrage bas placé devant la courtine.

- Bonnet de prêtre – Ouvrage extérieur formé d’un tracé en tenaille double entre deux ailes formant un angle au milieu de la courtine (Figure 144, E).
- Ouvrage à tenaille (simple) – Ouvrage bas placé devant la courtine et formé de deux faces en angle rentrant et de deux ailes parallèles (Figure 143, A).
- Queue d’(h)ironde – Ouvrage extérieur formé d’un tracé en tenaille entre deux ailes formant un angle au milieu de la courtine (Figure 143, B)
- Ouvrage à tenaille double – Ouvrage dont la tête est formée par quatre faces, qui forment deux angles rentrants et trois saillants et dont les ailes qui sont parallèles joignent sa tête à sa gorge (Figure 143, C).

- Ravelin – Terme employé pour parler de l’ouvrage à deux faces protégeant la courtine, lorsque l’on nomme demi-lune l’ouvrage situé à la pointe des bastions (Manesson Mallet, 1696 ; 56).

- Tenaille – Ouvrage bas placé devant la courtine dont les faces sont dans le prolongement de celle des demi-bastions qu’ils l’encadrent.

- Tenaille (simple) – Tenaille dont les deux

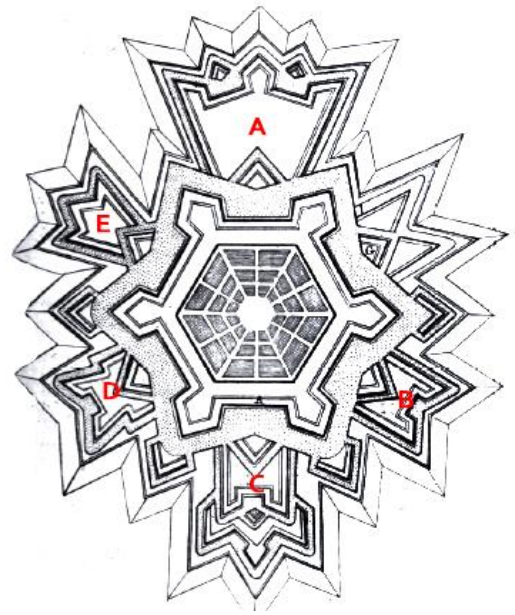


Figure 143. Une couronne (A), une corne (B), une corne couronnée (C), une corne à double flanc (D) et un bonnet-de-prêtre (E).

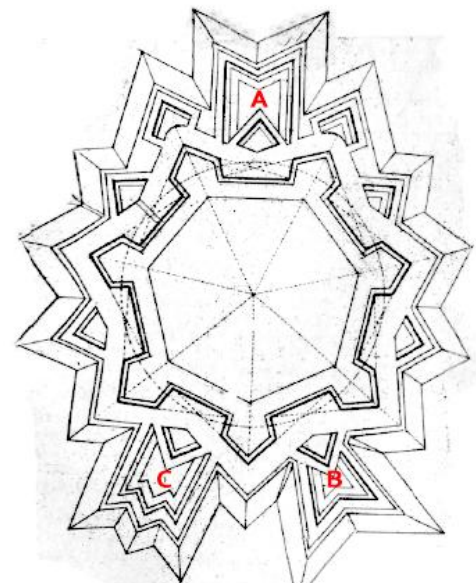


Figure 144. Un ouvrage à tenaille (A), une queue d’hironde (B) et une tenaille double (C).

faces forment un angle rentrant.

- Tenaille à pans coupés – Tenaille dont les deux faces, au lieu de se rencontrer en angle, sont réunies par un petit front droit.
- Tenaille bastionnée – Tenaille ayant le tracé d'un front bastionné.

▪ Tenailon, grande lunette ou contre-garde – Dehors triangulaire couvrant une des faces de la demi-lune.

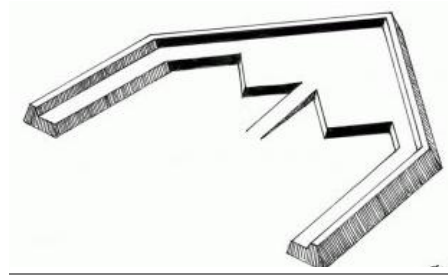


Figure 145. Une lunette.

(2) Ouvrages avancés

Tous les ouvrages extérieurs qui sont construits au-delà du chemin-couvert.

- Chemin couvert – Espace à ciel ouvert établi sur la contrescarpe et défilé par le parapet du glacis. Il fait généralement 10 à 12 mètres de large.
- Avant chemin-couvert – Second chemin-couvert doublant, du côté de l'ennemi, celui qui est établi sur la contrescarpe.
- Glacis – Ouvrage avancé faiblement incliné raccordant la crête du chemin couvert au niveau naturel du terrain.
- Avant-Glaciis – Glacis de l'avant chemin-couvert.
- Place d'Armes – Ouvrage avancé laissé libre pour le rassemblement d'une troupe sur le chemin-couvert pour les sorties. Les places d'armes peuvent être saillantes (tournées vers la campagne), ou rentrantes (tournées vers la place).
- Redan, redent, flèche ou bonette – Ouvrage avancé possédant généralement deux faces dont l'angle saillant est tourné vers la campagne. À la différence de la lunette, le redan n'a pas ou peu de flancs.
- Lunette – Fort détaché, ouvrage avancé de l'architecture bastionnée de Cormontaigne, de même forme que la demi-lune, mais non intégré comme celle-ci dans un système bastionné. C'est un redan aux faces duquel ont été ajoutés des flancs (Figure 145).
- Redoute – Fort détaché, ouvrage avancé spécialement construit pour servir de réduit local et généralement pour porter de l'artillerie. Sa forme est souvent carrée et peut être provisoire.

v) Autres ouvrages

- Banquette – Emplacement surélevé accolé au parapet d'un rempart ou d'un chemin-couvert pour permettre au soldat ou à l'artillerie de tirer au-dessus de ce parapet dont la hauteur a été calculée pour assurer le défilement d'un homme debout.
 - Banquette d'infanterie
 - Banquette d'artillerie ou barbette – surélévation du terre-plein d'un ouvrage de fortification, accolé à son parapet, servant à porter l'artillerie, de façon qu'elle puisse tirer au-dessus de ce parapet, quand celui-ci n'a pas de créneaux (ajouter illustration p515).
- Chaînage – Appareil de pierre destiné à renforcer la maçonnerie.

- Chaînage d'angle – Formant l'angle saillant de la jonction de deux murs (Illustration 5, a).
- Chaîne de refend – Trahis la présence d'un mur de refend, d'un contrefort (Illustration 5, b).
- Cordon – Moulure semi-circulaire de pierre correspondant à la ligne magistrale ; elle délimite la partie vue de la partie non vue de l'assaillant.
- Merlon ou trumeau – Partie du parapet terminée par deux embrasures d'une batterie. La largeur est ordinairement de neuf pieds en dedans et de six pieds en dehors (Illustration 6, H).
- Parapet – Massif gazonné ou mur défilant les emplacements de tir à ciel ouvert, composé des éléments suivants¹ :
 - Plongée du parapet – Talus de forte inclinaison vers l'extérieur, qui limite le parapet à sa partie supérieure et au-dessus duquel on tire ;
 - Embrasure – Créneau, ouverture dans un parapet ou une casemate pour permettre le tir. L'embrasure est constituée des éléments suivants :
 - joues de l'embrasure – Faces intérieures raccordant l'embrasure au merlon (Figure 146, A),
 - entrée de l'embrasure - Partie de l'embrasure tournée vers l'intérieur (Figure 146, B),
 - bouche de l'embrasure - Partie de l'embrasure tournée vers l'extérieur (Figure 146, C),
 - sol de l'embrasure - Partie horizontale de l'embrasure (Figure 146, D),
 - rétrécissement - (Figure 146, E),
 - hauteur de genouillère – Distance avec le sol de la batterie (Figure 146, F),
 - directrice de l'embrasure - Ligne bissectrice du sol. Si la directrice est perpendiculaire à la crête du parapet, l'embrasure est directe, sinon elle est oblique (Figure 146, G).
 - Tablette – Couronnement de l'escarpe qui tient le rôle de chaperon (eau de ruissellement).
 - Berme, relais ou lisière – Espace aménagé entre le pied d'un rempart et de l'escarpe d'un fossé pour arrêter les terres provenant de l'éboulement du rempart et éviter que celles-ci ne comblent le fossé.
 - Boulevard – Ouvrage porteur d'artillerie ajouté en avant d'une courtine plus ancienne.
 - Casemate – Souterrain voûté construit dans le corps d'un ouvrage (bastion, demi-lune, courtine) où sont aménagées des embrasures pour tirer le canon à couvert.
 - Casemate active - casemate destinée à servir d'emplacement de tir.
 - Casemate passive - casemate qui ne peut servir que de caserne.

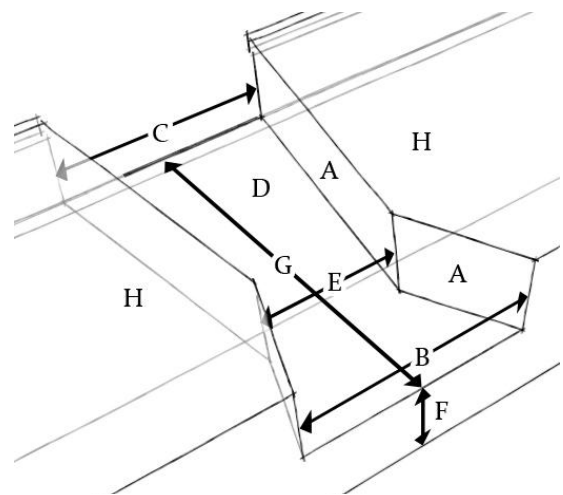


Figure 146. Eléments constituant l'embrasure

c) Autres ouvrages

- Batterie – Emplacement aménagé pour recevoir un groupe de canons tirant dans une direction commune.
- Cavalier – Ouvrage en terre-plein portant de l'artillerie et placé sur un autre ouvrage dont il double les feux, il est doté de deux faces et de deux flancs (cavalier de courtine, de bastion, etc.).
- Moineau ou Caponnière – Ouvrage bas, en saillie de l'escarpe, pour assurer le flanquement des fossés.
- Réduit – Ouvrage construit à l'intérieur d'un autre où l'on peut se retrancher pour prolonger la résistance (réduit de demi-lune par exemple).
- Traverse – Mur ou massif de terre construit en épi dans la largeur d'un chemin couvert ou d'un terre-plein de rempart, pour éviter qu'il ne soit pris en enfilade.
 - Traverse du chemin-couvert (Illustration 7, b).
 - Traverse en capitale – Ouvrage construit sur la capitale d'un bastion, d'une tour, etc.
 - Traverse abris ou casematé – Ouvrage creux pouvant abriter des défenseurs à la manière des réduits.
 - Crochets à clameaux – Traverses s'engageant en épi dans des encoches rectangulaires du parapet formant un passage appelé chicane.
 - Traverse à passage – Ouvrage
 - Crochets en crémaillère – Traverses s'engageant en épi dans les dents d'un parapet dessiné en crémaillère.
 - Traverse conjuguée – Traverses dont les épis de sens contraire se couvrent deux par deux.
 - Traverse enracinée – Traverses s'appuyant sur un parados, massif de terre élevé derrière les emplacements de tir pour les mettre à l'abri des coups de revers.
- Enveloppe – Terrain défensif entourant un ouvrage fortifié et débordant sur le glacis.
- Fausse-braie ou basse-enceinte – Enceinte basse enveloppant une partie ou la totalité du corps de place. Contrairement à la braie, la fausse-braie est remparée.
 - Orillon ou épaulement – Prolongement d'une face au-delà de l'alignement d'un flanc ou d'une autre face, servant à couvrir les pièces de ce flanc ou de cette face. Lorsque l'orillon est formé d'une ligne droite, on parle d'épaulement.
 - Revers de l'orillon - Partie de l'orillon faisant face à la courtine et souvent pourvue de poternes³.
 - Talus - Pente d'un rempart ayant un fruit accentué pour assurer la stabilité naturelle des terres.
 - Talus intérieur – Ceux tournés vers la place.
 - Talus extérieur – Ceux tournés vers l'attaque.

d) Édifices militaires

Ensemble des constructions lié à la défense d'un territoire et concernant le transport, le ravitaillement ou le logement des troupes.

- Arsenal – Entrepôt et atelier de réparation dont le plan est soit rectangulaire, soit en U autour d'une cour fermée ou encore en équerre.
- Caserne – Bâtiment dont la trame peut être décalée verticalement sur les terrains en pente et qui est généralement construit le long des courtines.
- Corps de garde – Bâtiment abritant les troupes de gardes de la porte principale ou les douaniers de l'octroi. On les trouve aux portes de la ville, sur les remparts, sur les ouvrages avancés, etc.
- Corps de garde avancé – Corps de garde en avant-poste sur les demi-lunes.
- Église – Bâtiment présent dans chaque citadelle. Ses formes demeurent simples.
- Guérite – Petite tourelle en encorbellement, servant de poste de guet et généralement située près d'une porte.
- Hôpital – Bâtiment organisé autour d'une cour centrale.
- Poudrière / Magasin à poudre – Bâtiment régi par un plan type variant selon la capacité recherchée, souvent placé dans un bastion creux et entouré d'un mur d'isolement.
- Pont-écluse – Ouvrage défensif destiné à inonder le fossé.
- Puits – Point d'eau souvent abrité sous un petit bâtiment voûté à l'épreuve des bombes.

e) Éléments de topographie

- Fortification de barrage – Fortifications s'appuyant sur un élément topographique qui protège naturellement le site.
- Confluent barré ou éperon de confluence – Éperon situé à la confluence de deux cours d'eau.
- Enceinte appuyée – Fortification dont un côté s'appuie sur une rupture de pente naturelle.
- Éperon barré – Relief allongé et en pointe, se détachant d'un ensemble plus étendu et dont la racine est barrée par un rempart.
- Méandre barré – Sinuosité marquée d'un cours d'eau barré par un rempart.
- Sommet fortifié – Sommet de colline ou point culminant de plateau entouré par un rempart. On peut le confondre avec le segment de crête qui est formé de la ligne sommitale d'un relief allongé.
- Île fortifiée – Étendue de terre entièrement entourée d'eau.
- Enceinte de contour ou continue – Place forte dont les structures défensives englobent la totalité du lieu défendu.

f) Concepts généraux

i) Principe

- Commandement – Un ouvrage commande un autre ouvrage quand il le domine de façon à le surveiller, le défendre et, au besoin, le battre.
- Défense dans la profondeur – Dispositif obligeant l'assaillant à rencontrer plusieurs lignes de défense successives afin de l'affaiblir et de ralentir sa progression vers la place.
- Défilement – caché aux vues et aux coups de l'ennemi.

- Droite / gauche – S'exprime toujours du point de vue du défenseur qui regarde l'ennemi.
- Étagement des feux – ?
- Flanquement – Un ouvrage est flanqué lorsqu'il est battu par le tir de flanquement (sensiblement parallèle à la ligne des fortifications) des ouvrages voisins. Le terme peut aussi désigner directement l'ouvrage.
 - Irréversibilité de la fortification – En laissant les gorges des ouvrages sans protection, on rend impossible leur occupation par l'ennemi.
 - Minimum de courtine – Angle mort théorique situé en milieu de courtine sous le prolongement de la plongée des parapets des bastions (en l'absence de casemates de flanc).

ii) Tir

- Tir de brèche ou en brèche – L'artillerie concentre son feu sur une zone précise de la muraille afin de l'ouvrir.
- Tir d'enfilade ou de flanquement – L'artillerie est placée dans le prolongement des faces de l'ouvrage.
- Tir de ricochet – L'artillerie cherche à utiliser les rebonds du projectile pour maximiser les dégâts.
- Tir d'obus ou parabolique – Le projectile suit une trajectoire à la courbure prononcée afin d'obtenir un grand pouvoir d'écrasement.
- Tir en barbette – Le tir s'effectue au-dessus du parapet réparé en l'absence d'embrasure.

g) Tracés notables

Projection en plan des lignes que dessinent les enceintes. Le relief de la fortification est qualifié de profil.

i) Front

- Front bastionné – Tracé dont toutes les parties se flanquent réciproquement. Il comprend donc cinq lignes : les faces et les flancs de deux demi-bastions et la courtine intermédiaire.
- Front tenaillé – Une enceinte entièrement traitée en système tenaillé prend la forme générale d'une étoile.
- Front en crémaillère – Tracé en dents de scie. Chaque ressaut constitue un petit flanc et assure le flanquement de la face contiguë.

ii) Partie d'ouvrage

- Aile, branche ou aileron – Partie latérale des ouvrages à cornes, des couronnes, des queues-d'hironde, des tenailles et des bonnets-de-prêtre, reliant ces ouvrages extérieurs à l'arrière.
- Gorge, ligne de gorge ou collet - Partie d'ouvrage faisant face à la place forte.
- Tête – Partie d'ouvrage faisant face à la campagne.

iii) Angles et lignes¹⁰⁶

- Angle mort – Angle dessinant une zone non atteinte par les projectiles des tirs directs.
- Angle rentrant – Angle aigu tourné vers la place.
- Angle saillant – Angle obtus tourné vers la campagne. Sa valeur minimum théorique serait de 60°.
- Angle du centre
 - Angle du centre d'un bastion – Angle formé par les deux demi-gorges, ou par le prolongement de deux courtines dans le bastion.
 - Angle du centre du polygone – Angle formé au centre d'un polygone régulier par deux rayons consécutifs.
- Angle de l'épaule – Angle formé par la rencontre d'une face et d'un flanc.
- Angle flanqué – Angle saillant formé par deux faces du bastion, d'un ouvrage à couronne, d'une demi-lun
- Branche du chemin-couvert – Côtés des différentes parties du chemin-couvert.
- Capitale – Ligne imaginaire joignant dans un ouvrage son angle flanqué à son angle du centre c'est-à-dire la bissectrice dans un ouvrage régulier.
 - Crête – Sommet des angles les plus élevés du profil
 - Crête du glacis, du chemin-couvert ou militaire – Ligne du parapet du chemin-couvert.
 - Crête de feu, crête du parapet intérieur, crête du parapet, ligne de feu – Ligne de faite de la fortification.
 - Crête du parapet extérieur – Ligne qui peut se confondre avec la magistrale lorsque la plongée rejoint directement la tablette.
 - Face – Élément de fortification faisant face à la campagne (face de la place d'armes, face de la demi-lune, du cavalier, etc.)
 - Flanc – Côté d'un ouvrage en retour sur une face, une courtine. Le raccord de la face et du flanc est un angle d'épaule.
 - Flanc (simple) ou plat – Flanc en ligne droite.
 - Flanc fichant – Flanc disposant d'un second flanc.
 - Flanc rasant – La ligne de défense est rasante.
 - Flanc droit – appelé ainsi pour le distinguer du flanc oblique.
 - Flanc couvert – Flanc protégé par un orillon ou un épaulement et abritant généralement des casemates.
 - Flanc concave – Flanc a priori toujours couvert qui forme une ligne courbe et dont la convexité est tournée vers l'intérieur du bastion.

¹⁰⁶ cf. Annexe : Figure 148. Lignes et angles principaux recensés lors de l'analyse des traités de fortification.

- Flanc oblique, flanc de courtine, second flanc ou feu de courtine – Partie de la courtine comprise entre le prolongement de la face du bastion et l'angle du flanc. On n'en trouve que dans les fortifications où la ligne de défense est fichante.
- Flanc retiré, flanc bas, place basse ou casemate – Flanc couvert le plus bas.
- Second flanc (chez de Ville) ou place haute – Flanc le plus élevé.
- Flanc étagé – Flanc formé d'une suite de terrasses à ciel ouvert.
- Flanc brisé – le flanc possède un angle rentrant.
- Flanc décroché.
- Queue du glacis – Point de contact de la pente du glacis avec le terrain naturel du côté extérieur.
- Ligne de défense – Lignes issues des angles du flanc aux angles flanqués sont appelées lignes de défense.
 - Ligne de défense rasante – Elles suivent le prolongement des faces.
 - Ligne de défense fichante – Le prolongement des faces donne sur la courtine.
- Magistrale ou ligne du cordon – Ligne principale d'un plan, d'un tracé sur le papier ou sur le terrain (magistrale de l'enceinte, magistrale du chemin-couvert,...)
- Terrain naturel, ligne de terre, rez-de-chaussée, niveau de campagne ou de sol – Niveau altimétrique correspondant au terrain naturel (Figure 147).

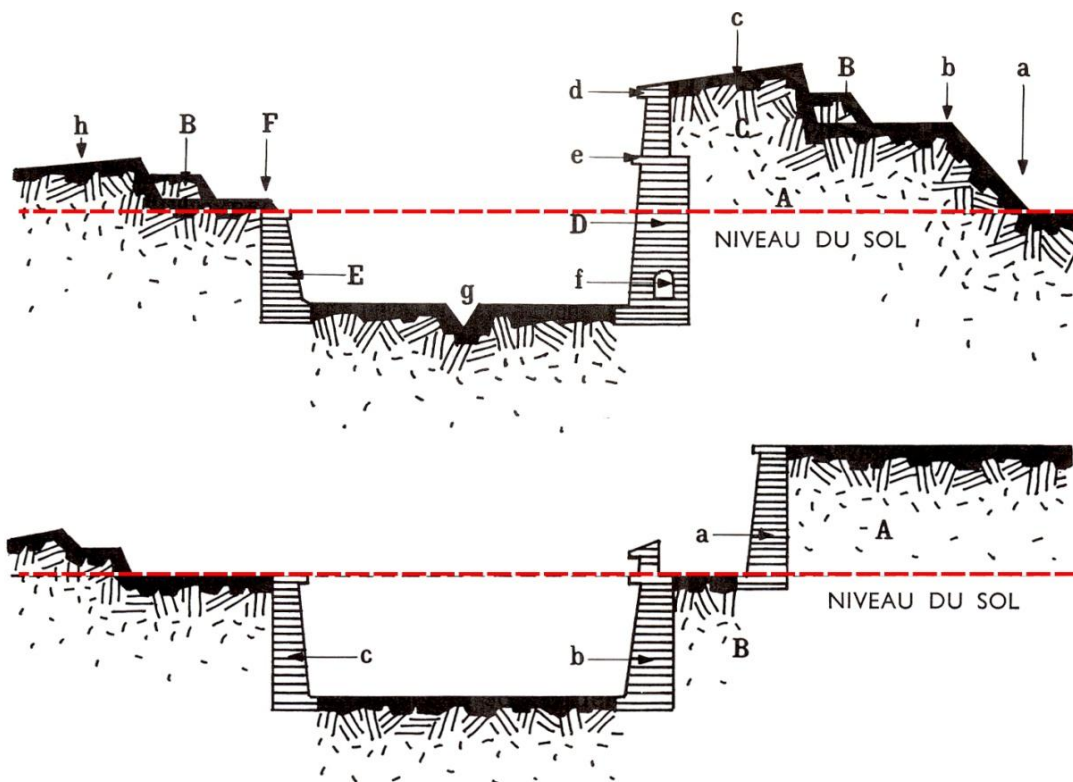
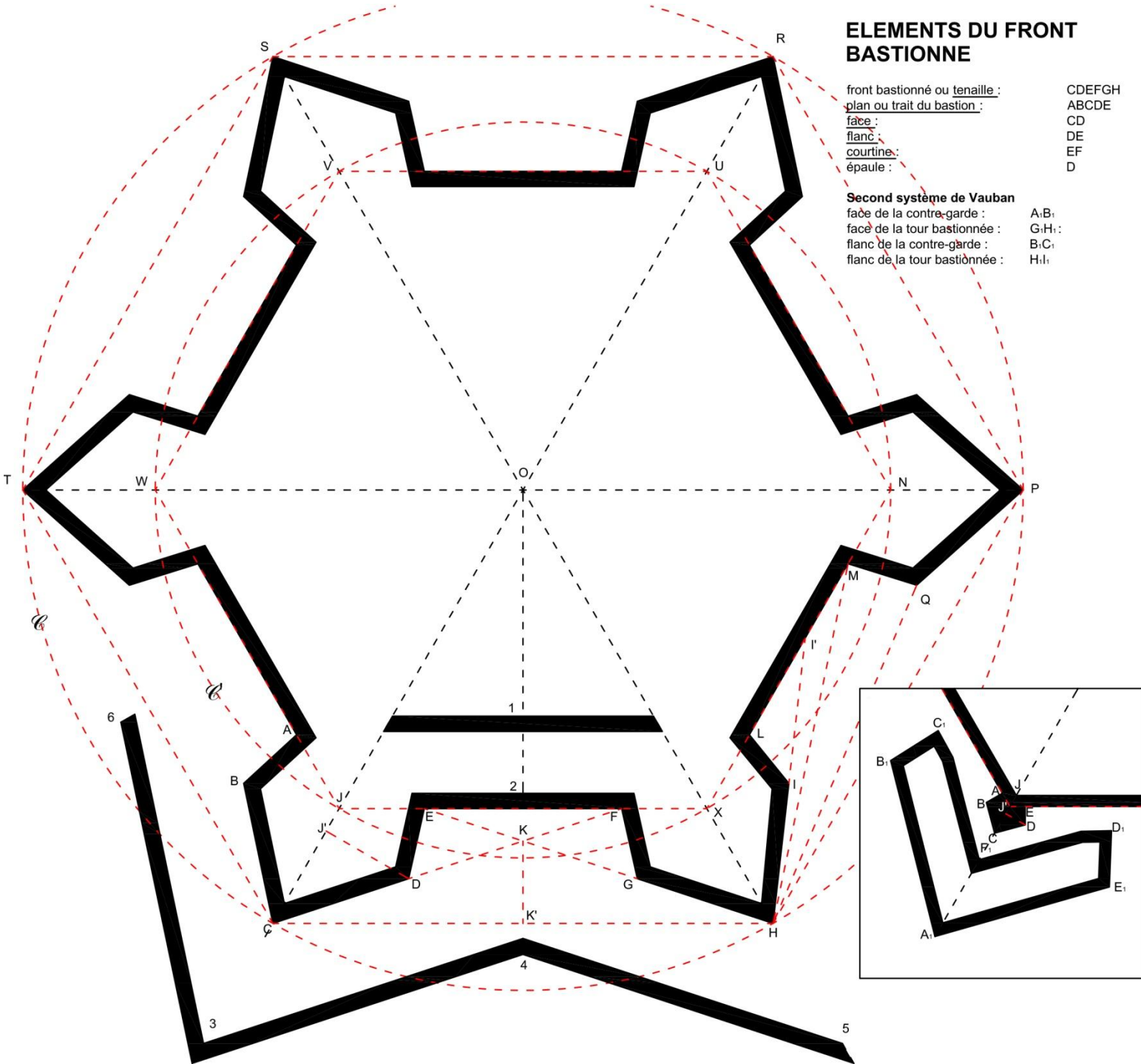


Figure 147. Niveau de sol (en poillé rouge) sur deux profils de fortification (la campagne est à gauche, la place à droite).
D'après : Pérouse De Montclos, 2000

ELEMENTS DU FRONT BASTIONNE

front bastionné ou tenaille : CDEFGH
 plan ou trait du bastion : ABCDE
 face : CD
 flanc : DE
 courtine : EF
 épaulement : D

Second système de Vauban
 face de la contre-garde : A:B;
 face de la tour bastionnée : G:H;
 flanc de la contre-garde : B:C;
 flanc de la tour bastionnée : H:I;



LIGNES

LIGNES DE CONSTRUCTION

capitale du bastion :	JC	ligne de base :	CH
circonférence extérieure :	⊖	ligne de défense flanquante ou rasante :	CF et HI'
circonférence intérieure :	⊙	ligne de défense fichante :	HM
côté du polygone extérieur :	CH	ligne du centre, petit rayon :	JO
côté du polygone intérieur :	JX	petite ligne de défense :	CF et HI'
gorge :	AE	polygone extérieur :	CHPRST
demi-gorge :	AJ	polygone intérieur :	JXNUVW
feu de courtine :	MI'	rayon extérieur :	CO
base ou pied du rempart :	12	rayon intérieur :	JO
grand rayon :	CO	second flanc, flanc oblique ou feu de la courtine :	MI'
grande ligne de défense :	HM		

ANGLES

ANGLES DE CONSTRUCTION

angle de la circonférence du polygone extérieur,		angle forme flanc :	JOE
angle du polygone extérieur,		angle de gorge :	CJE
angle de la figure extérieure :	CHP	angle de base :	OJX
angle de la circonférence du polygone intérieur,		angle rentrant de la contrescarpe :	345
angle du polygone intérieur,		angle saillant de la contrescarpe :	634
angle de la figure intérieure,			
angle du centre du bastion :	JXN	ANGLE DE LA FORTIFICATION	
angle du centre (du polygone),		angle de l'épaulement :	CDE
angle du milieu de la figure :	COH	angle du flanc ou de la courtine :	DEF
angle diminué :	DCH ou HI'M (Ozaman)	angle flanqué du bastion :	BCD
angle flanquant intérieur :	II'L, DFE (si pas de rasante)		
angle de défense :	KDE	BRISURES	
angle flanquant (extérieur),		angle saillant ou vif : en dehors de la figure	
angle de la tenaille :	CKH	angle rentrant ou mort : vers le centre de la figure	

Figure 148. Lignes et angles principaux recensés lors de l'analyse des traités de fortification.

2) Comparaison des représentations d'un algorithme sur quatre éditeurs de programmation visuelle

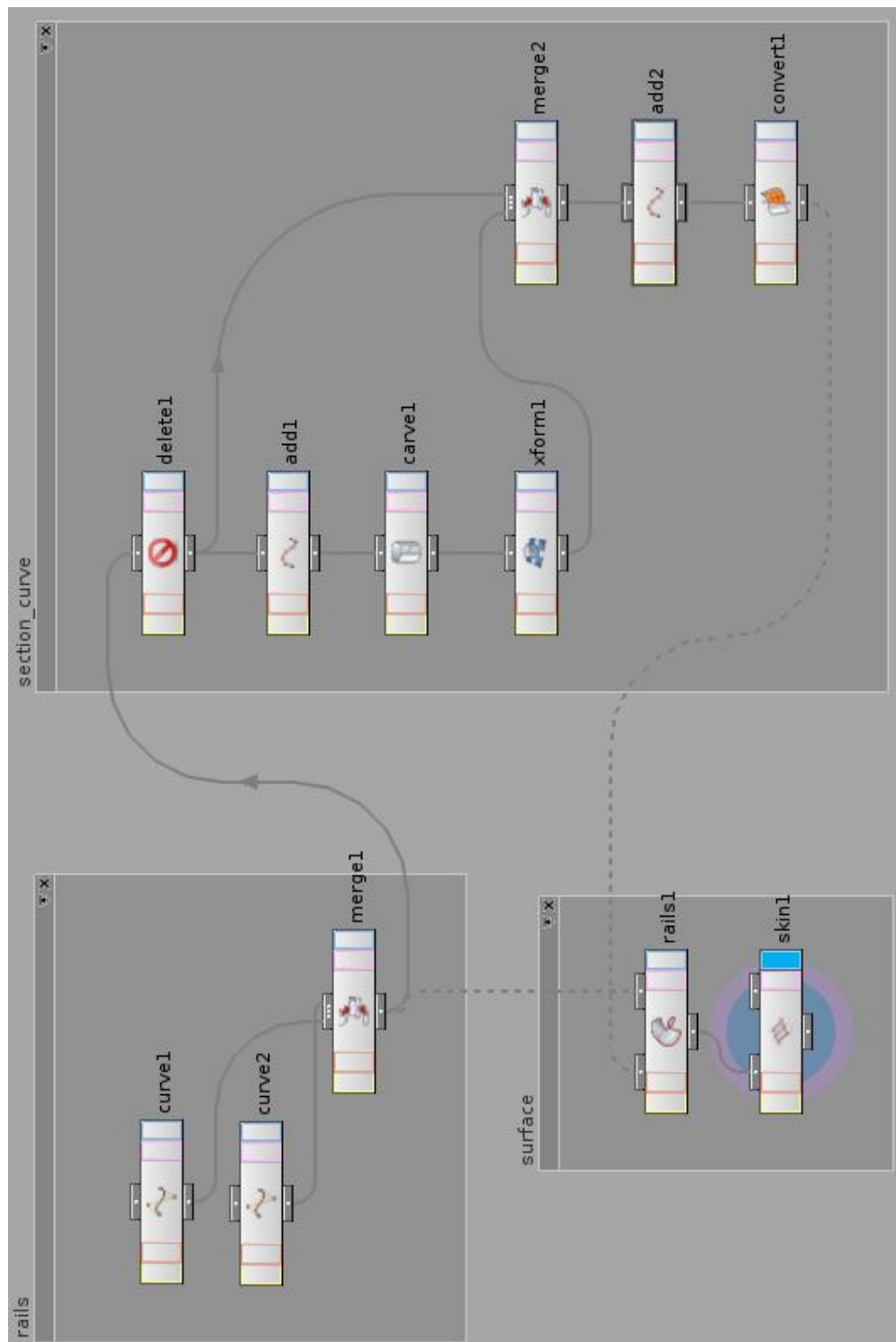


Figure 149. Création d'une surface par une opération de *loft* sur Houdini.

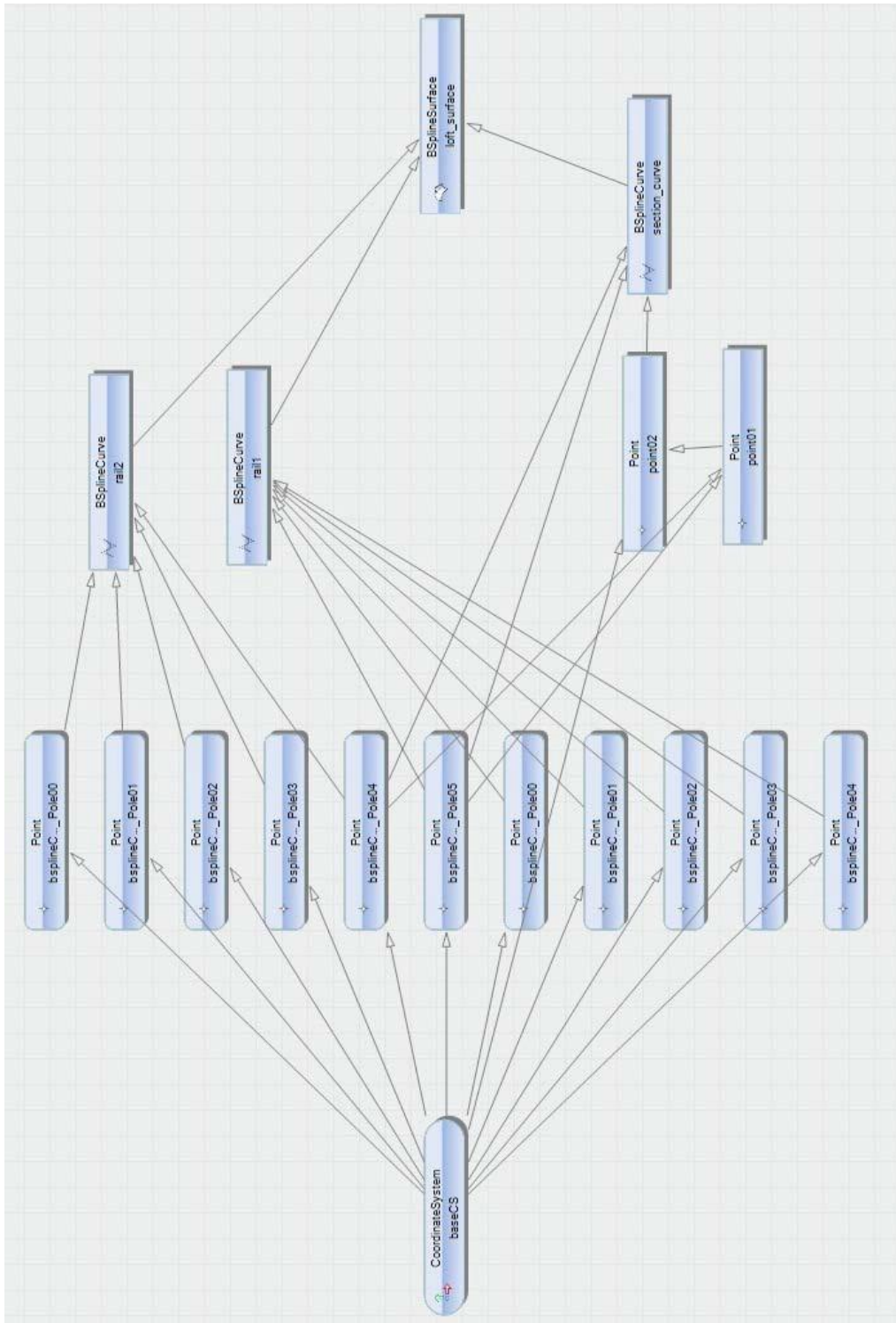


Figure 150. Création d'une surface par une opération de *loft* sur Generative Component.

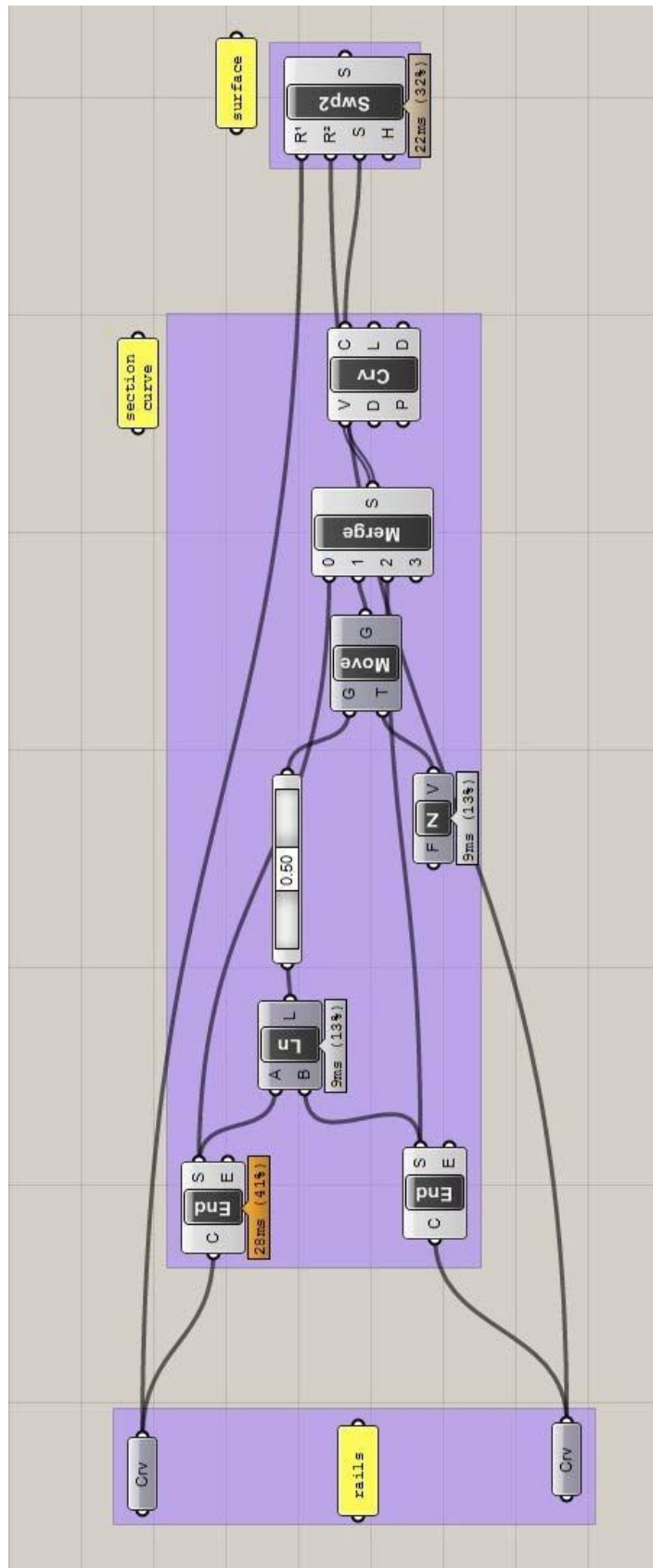


Figure 151. Création d'une surface par une opération de *loft* sur Grasshopper.

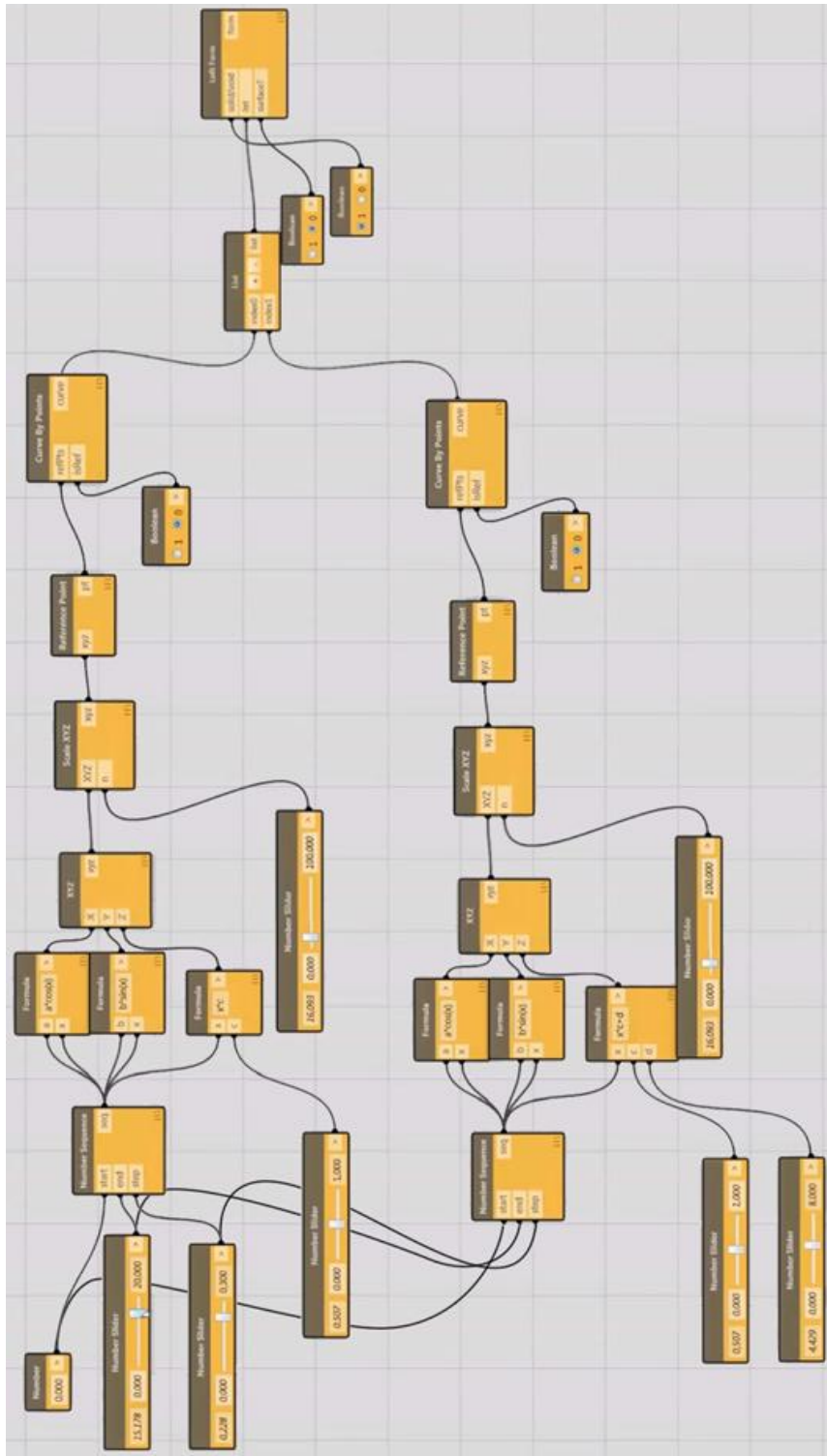


Figure 152. Création d'une surface par une opération de *loft* sur Vasari pour Revit.
 D'après : <http://youtu.be/8E1Ph7yAuGk>

3) Tables du plan-relief de Toul

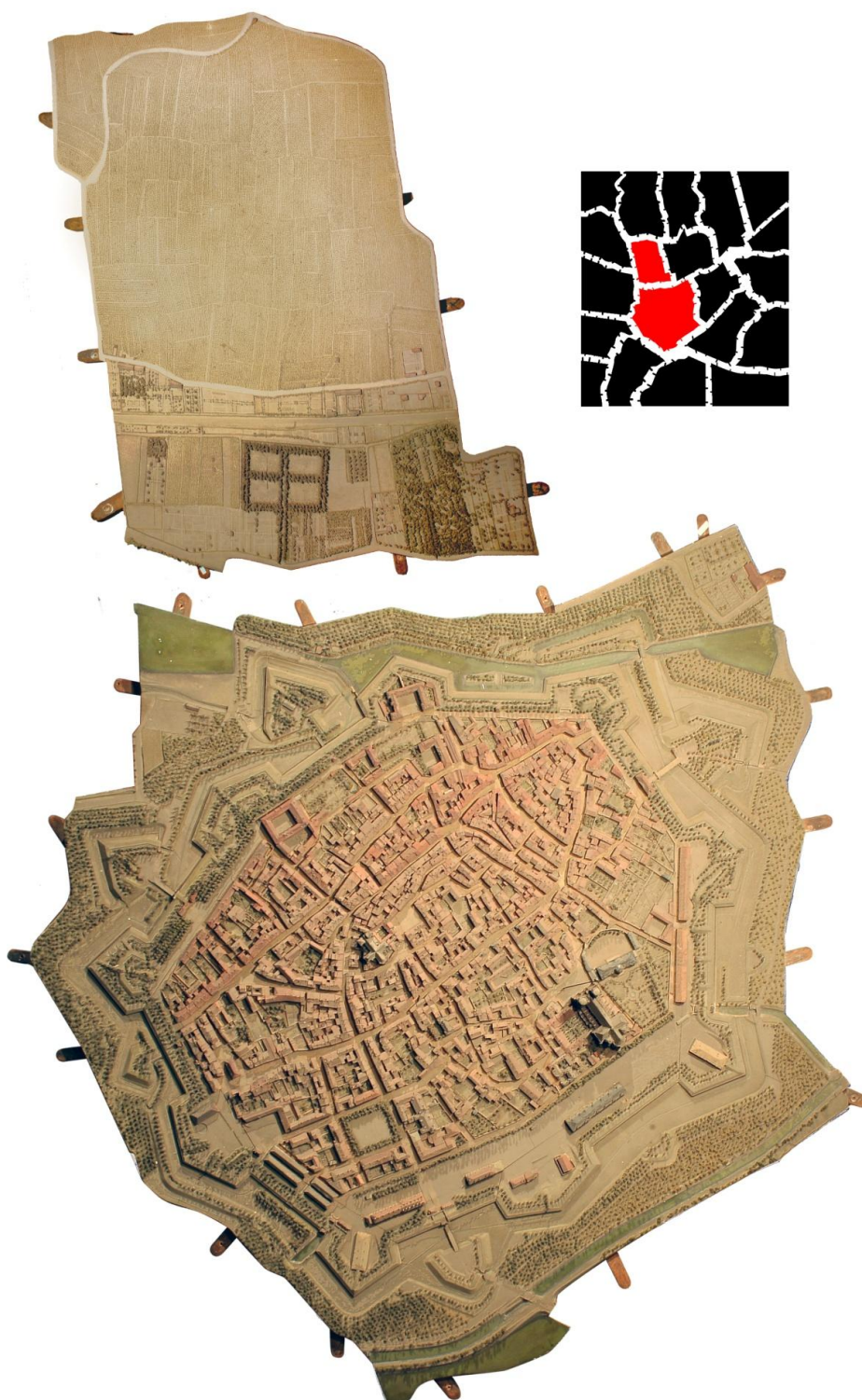


Figure 153. Table 1, dite table de ville, et table 4 du plan-relief de Toul. L'ensemble de la maquette est composé de vingt tables représentant une surface totale d'environ 39m² (6,66 x 5,83 m)

4) Carte représentant les principales interventions de Vauban.

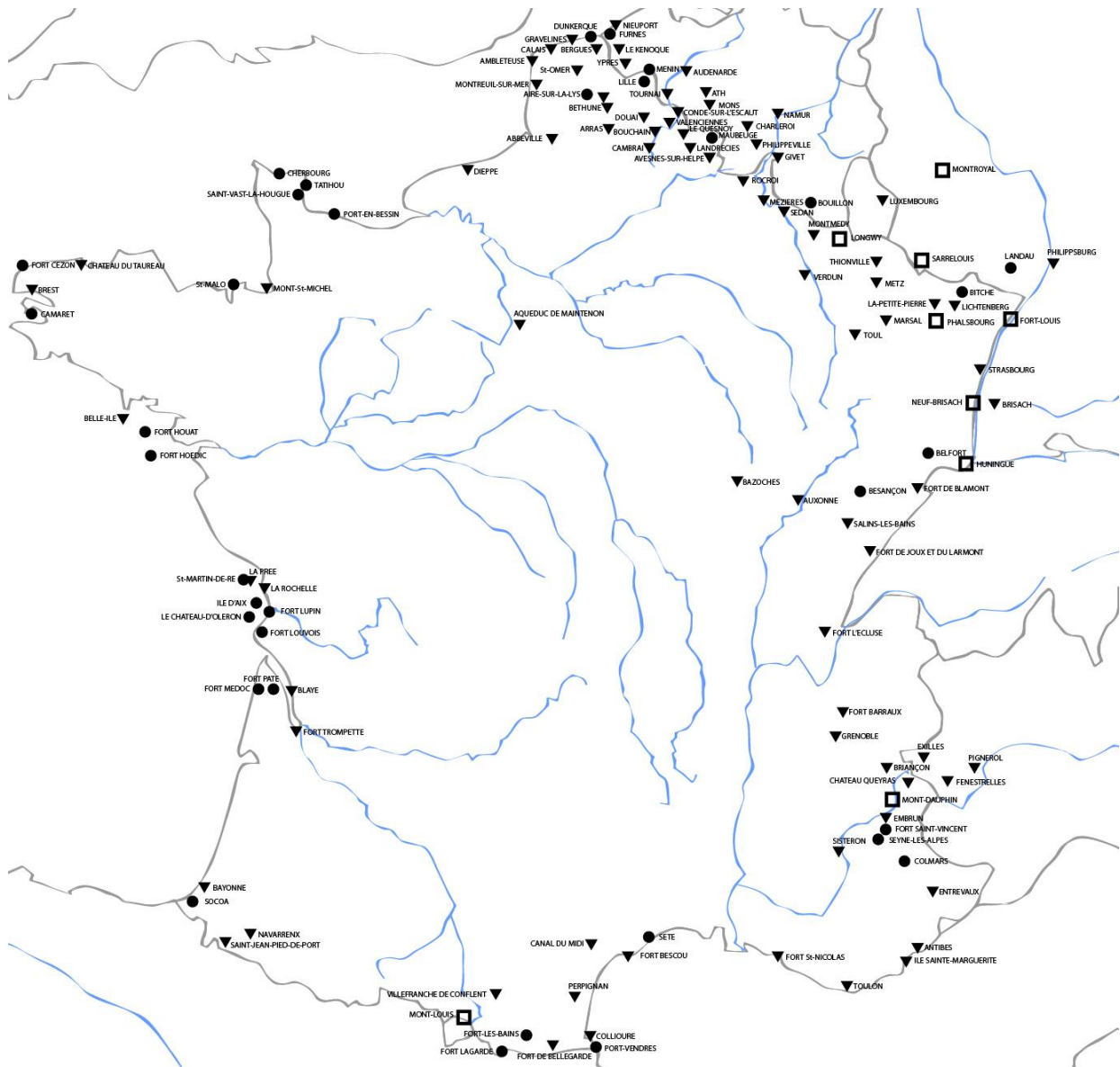


Figure 154. Principales places fortes (□), enceintes ou forts (●) construits ou modifiés (▼) par Vauban.
 D'après : Orgeix et al., 2007 ; Réseau Vauban, 2012

5) Les vagues de publication de traités de fortification

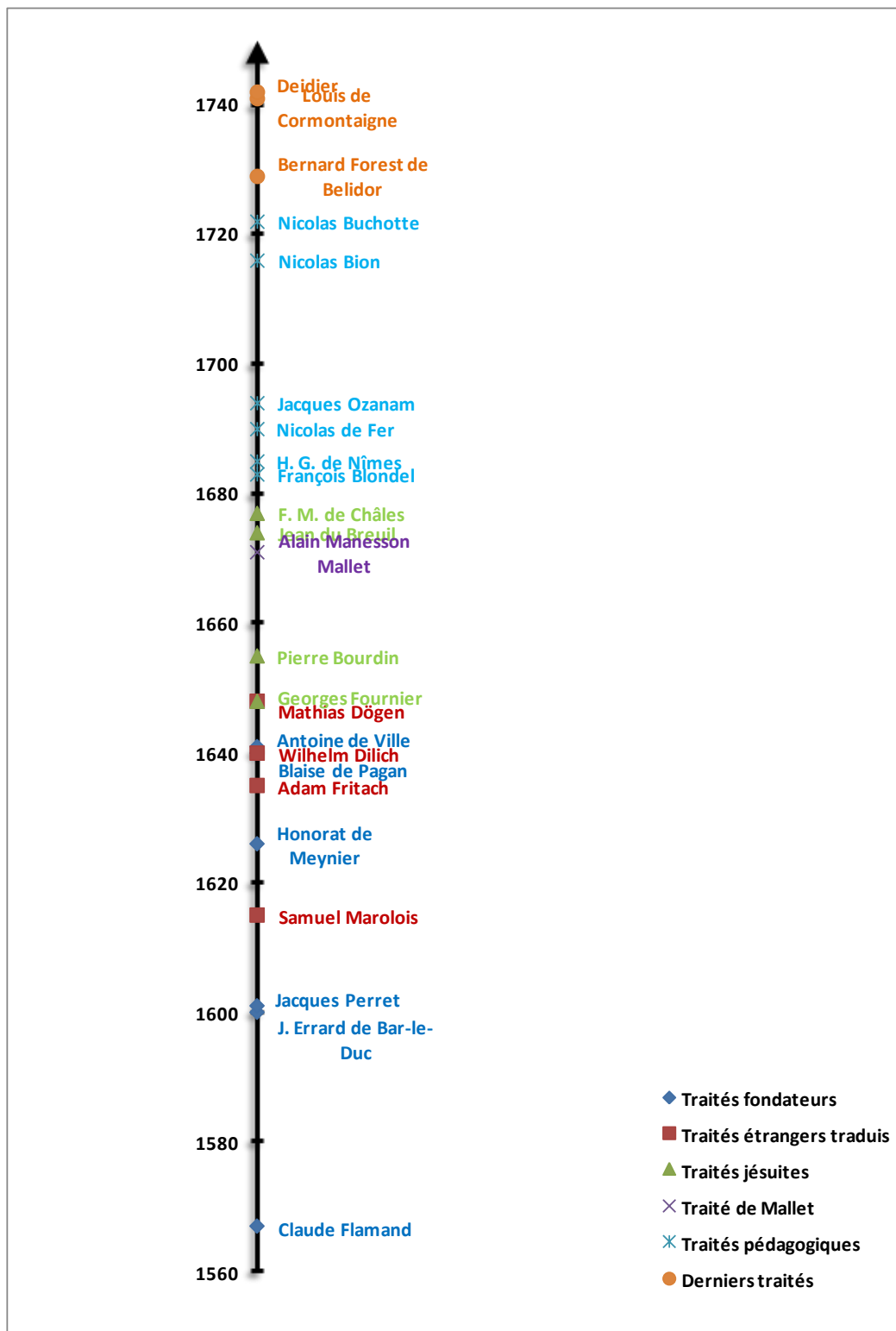
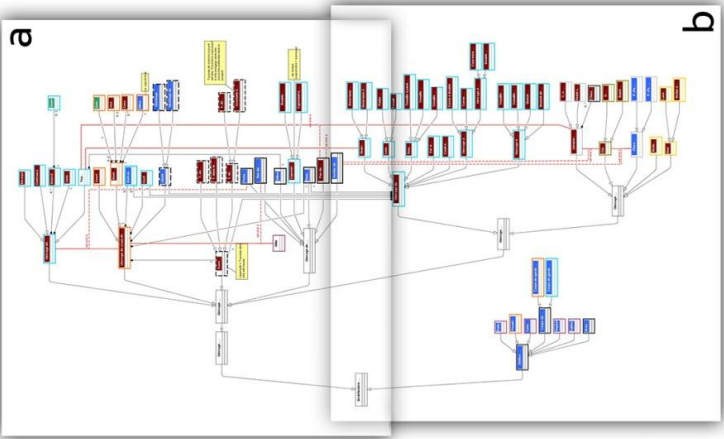
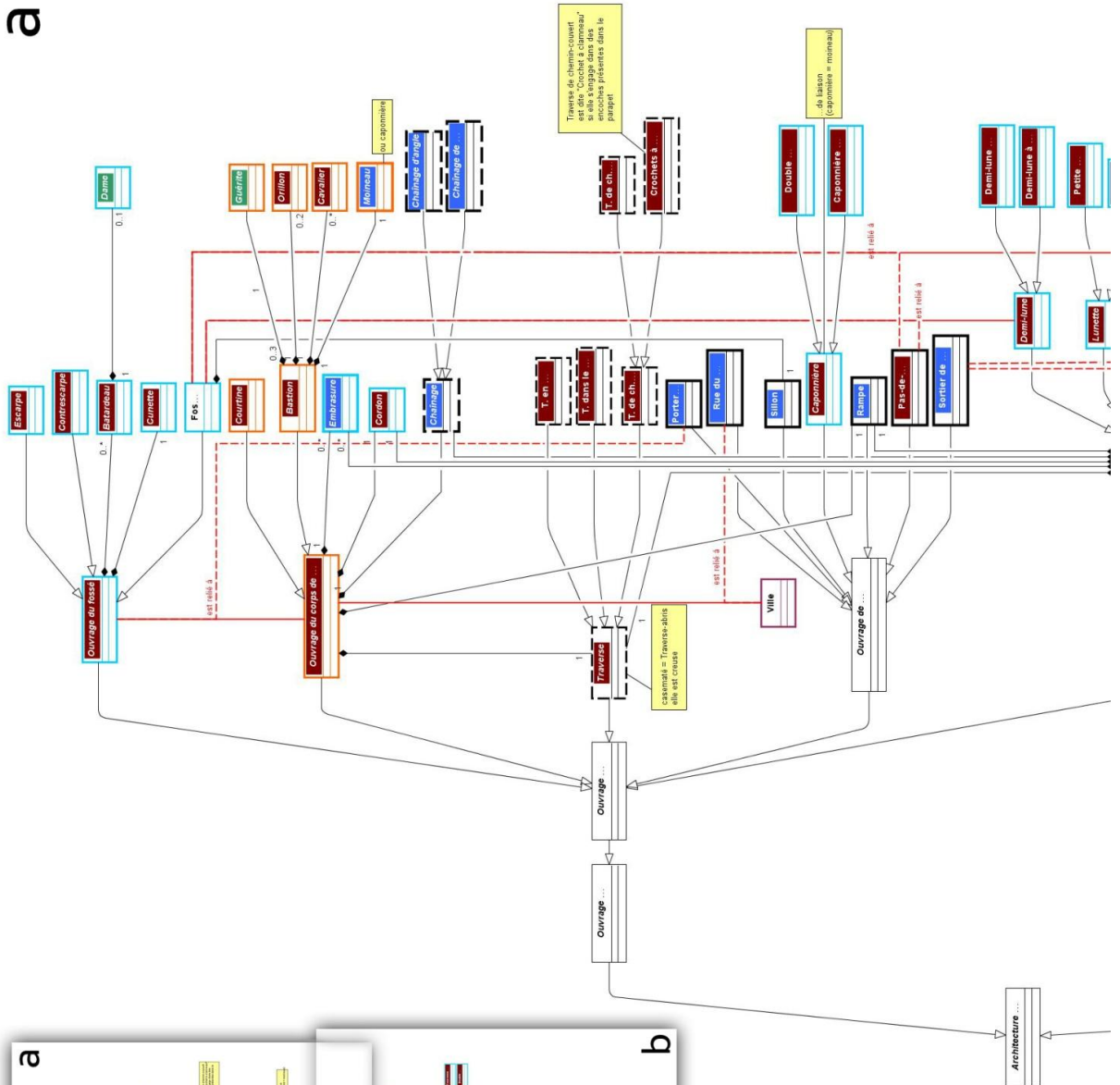


Figure 155. Frise chronologique représentant quelques uns des auteurs de traités de fortification selon la date de publication de l'ouvrage.

D'après : Orgeix, 2009a

7) Modèle de connaissance de la fortification bastionnée

a



8) Les plans-reliefs de Lorraine et d'Alsace

La Lorraine et l'Alsace constituent des territoires clefs dans la stratégie de Louis XIV. L'état formé par les possessions des Habsbourg autour du royaume conduit la royauté française à une politique visant à couper ces axes de communication ennemis en en prenant possession. Des places fortes sont remaniées, d'autres sortent de terre comme Neuf-Brisach dont le plan-relief rend compte du projet à venir. Les plans-reliefs de places alsaciennes, parmi lesquelles on compte Belfort, rattachée à la Franche-Comté en 1922 seulement, sont toutes réalisées au XVIIIe siècle tandis que les maquettes de places lorraines figurent parmi les dernières exécutées. Ces maquettes sont donc relativement récentes si l'on considère l'âge moyen des maquettes de la collection : autour de 1763 (Tableau 9).

Ce panel de plans-reliefs est intéressant à plus d'un titre, car il illustre également les trois systèmes de Vauban à travers les maquettes de Toul, Huningue et Neuf-Brisach. Metz dispose d'une copie de tailles réduites et récentes, ce qui est susceptible de permettre un meilleur accès aux différentes parties de la maquette dont l'état de conservation est meilleur que celui de l'original. D'autres répliques existent : il s'agit des plans-reliefs de Strasbourg et de Bitche dont on a réalisé une copie suite après que la Prusse a emporté 19 maquettes à la chute de l'Empire. Le catalogue sommaire des plans-reliefs des places fortes de Lorraine et d'Alsace présenté ci-après s'appuie plus particulièrement sur les ouvrages et les sites web suivants :

- *Le musée des plans-reliefs : Hôtel national des Invalides* (Brisac, 1981);
- *Le musée des plans-reliefs : maquettes historiques de villes fortifiées* (Warmoes, 2012) et ;
- *La route des fortifications dans l'est* (Martin, Lemaître, 2007)
- l'association Réseau des sites majeurs Vauban¹⁰⁷ et ;
- l'exposition La France en relief¹⁰⁸.

¹⁰⁷ <http://www.sites-vauban.org/>

¹⁰⁸ <http://www.maison-histoire.fr/> (inaccessible)

a) Le plan-relief de Belfort

Construit	1755, mis à jour en 1818 ; restauré en 1948 et 1968
Échelle	1/600
Dimensions	4,91 m x 4,27 m
Cahiers de développement	Non conservés

Rattachée à la France en 1648 par le traité de Westphalie, la place forte de Belfort est remaniée avant l'intervention de Vauban en 1675. En 1687, il procède à d'importantes modifications en dotant l'enceinte de cinq tours bastionnées dotées de contre-gardes, dispositif caractéristique du second système de Vauban qu'il avait imaginé à Besançon. L'ancien château est transformé en citadelle. Après 1815, les fortifications sont renforcées sur les ordres du général Haxo, le « Vauban du XIXe siècle » ce qui permet à Belfort de résister à trois sièges dont celui de 1870 qui voit l'échec des Prussiens dans l'assaut de la ville.

En se basant uniquement sur les dates, le plan-relief de Belfort correspond à l'état des fortifications telles que Vauban les a réalisées à la fin du XVIIe siècle. Les mises à jour de 1818 semblent être antérieures aux interventions de Haxo. La carte de 1780 (Figure 158, b), nous permet de supposer que le plan-relief présente la place forte avec son enceinte renforcée par la présence d'une citadelle.



Figure 158. Détails du plan-relief de Belfort (a), réalisé en 1755 et mis à jour en 1818, et d'un plan de Belfort daté de 1780 (b).
Photo : Musée des Plans-reliefs / Christian Carlet et Gallica

b) Le plan-relief de Bitche

Construit	1825 et 1828, restauré et mis à jour en 1852 ; réparé sommairement en 1925
Échelle	1/600
Dimensions	6 m x 5,03 m
Cahiers de développement	Conservés et numérisés en 2012

Dévastée par les Suédois au XVIIe siècle, la place forte de Bitche est reconstruite par Vauban en 1681, deux ans après son annexion par le traité de Nimègue. La citadelle est alors construite, un ouvrage à cornes formé de deux demi-bastions est construit devant le front bastionné est tandis qu'une demi-lune vient flanquer le front ouest. Vauban fait aussi construire le long des longues courtines deux bastions inférieurs (Boucon, 2007). Démantelée après le traité de Ryswick, elle est finalement reconstruite en 1740 par Louis de Cormontaigne (1695 – 1752), un élève de Vauban. Les remparts sont reconstruits à l'emplacement des fondations de Vauban. Il ajoute des ouvrages bastionnés bas devant les réalisations de son prédécesseur. Une queue d'hironde et une contre-garde viennent compléter les ouvrages défensifs de la citadelle.

Un premier plan-relief antérieur à 1697 a disparu au XVIIIe siècle. Le plan-relief actuel (Figure 159), de 1825, est en fait un remplaçant de la maquette de 1794 enlevé par les Prussiens en 1815. Ce dernier est rendu à la ville de Bitche au début du XXe siècle et est exposé à la citadelle. La maquette du XIXe siècle représente les alentours afin de prendre en compte les progrès de l'artillerie. Il fut remis à jour en 1853 pour rendre compte de nouveaux remparts de la ville. Le plan-relief de Bitche montre les fortifications après les interventions de Cormontaigne.



Figure 159. Détail du plan-relief de Bitche construit entre 1825 et 1828 et mis à jour en 1852.

Photo : Musée des Plans-reliefs

c) Le plan-relief de Huningue

Construit	1753, restauré en 1920 (amputé des tables de la campagne environnante)
Échelle	1/600
Dimensions	1,88 m x 2 m (à l'origine 5,18 m x 4,50 m)
Cahiers de développement	Non conservés

Point de franchissement sur le Rhin, la place forte de Huningue est cédée à la France en 1648. Modifié selon les plans de Vauban entre 1680 et 1681 afin de contrôler le gué du Rhin et de renforcer la ville par rapport à Bâle, c'est une ville neuve qui fait place au village médiéval. Cinq bastions à orillons, des tenailles, cinq demi-lunes équipées de traverses et de réduits, une contre-garde, deux ouvrages à cornes, une redoute et une tête de pont renforcée de deux bastions sur la rive gauche forment l'arsenal défensif de la place. Assiégée par 20 000 Autrichiens, Huningue parvient à résister durant trois mois. Partiellement démoli en 1697, le pont et le fort de la rive gauche sont reconstruits en 1741, démoli dix ans plus tard et reconstruits en 1796 avant que Huningue ne soit définitivement démantelé en 1815, suite à un siège autrichien de deux mois.

En 1968 est réalisée une copie du plan-relief de Huningue qui est exposée dans la ville. Le plan-relief de 1753 montre les fortifications réalisées par Vauban, c'est-à-dire une ville neuve barrant le Rhin (Figure 160).



Figure 160. Détail du plan-relief construit en 1753 de la place forte d'Huningue.

Photo : Ministère de la Culture (France) - Médiathèque de l'architecture et du patrimoine - diffusion RMN

d) Le plan-relief de Marsal

Construit	1839, mis à jour en 1860 ; réparé sommairement en 1925
Échelle	1/600
Dimensions	6,57 m x 4,82 m
Cahiers de développement	Conservés et numérisés en 2012

Après 1689 et le traité de Ryswick, Marsal est fortifiée par Vauban qui s'appuie essentiellement sur la Seille pour réaliser ses défenses. Il ne modifie pas le tracé des remparts et se contente d'utiliser les anciennes fortifications devant lesquelles il fait construire de nouvelles demi-lunes, réaménage les deux portes et les écluses (Boucon, 2007). Le tracé de l'enceinte n'est toujours pas satisfaisant en 1775. Des fronts sont trop petits, d'autres, trop grands, des fossés trop larges, des bastions forment des angles droits avec leurs courtines et un promontoire non fortifié domine la cité. Ce sont autant d'éléments profitables à un éventuel assaillant. La porte de France, encore visible, est antérieure à Vauban. Elle est entourée de trois casernes (à l'origine quatre) dont la construction est à l'initiative de l'ingénieur. Sous Louis-Philippe, une grande caserne et deux forts détachés, les forts d'Harancourt et d'Orléans sont construits. Le plan-relief dépeint une place forte avec une enceinte continue et avec une irrégularité assez faible (Figure 161).

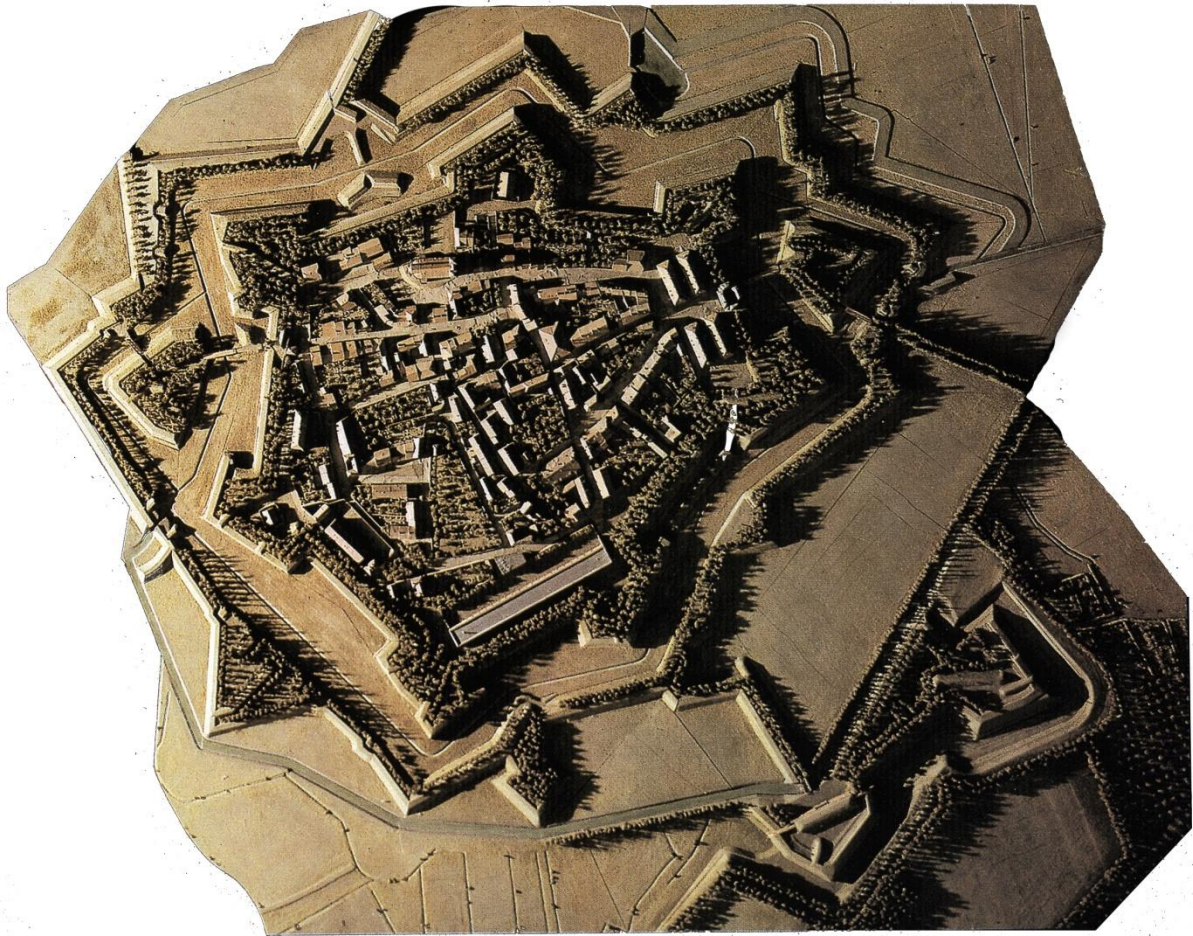


Figure 161. Détail du plan-relief de Marsal construit en 1839 et mis à jour en 1860.

Photo : Jean-Claude Planchet

e) Les plans-reliefs de Metz

Construit	1821 à 1825, mise à jour commencée en 1868
Échelle	1/600
Dimensions	9,22 m x 7,50 m
Cahiers de développement	Conservés et numérisés en 2012

Devenue française en 1648, la place forte de Metz est perfectionnée par Vauban puis par Cormontaigne continuant ainsi l'œuvre que son prédécesseur n'avait pu réaliser faute de moyens. La citadelle, construite entre 1556 et 1564 et protégée par quatre bastions à orillons (Boucon, 2007) est améliorée en même temps que les remparts de la ville par l'ajout de sept demi-lunes et d'ouvrages à cornes. Les principaux ouvrages, les deux doubles couronnes du fort de Bellecroix et du fort Moselle, ne sont construits qu'entre 1732 et 1736 par Cormontaigne qui s'attache à poursuivre les travaux de ses prédécesseurs tout en appliquant sa propre méthode.

Un premier plan-relief datant de 1688 a disparu au XVIII^e siècle. Le second plan, réalisé entre 1821 et 1825 reste inachevé. Il figure l'état de la ville avant 1870 et les grands bouleversements urbains engagés sous l'annexion allemande. Une copie partielle, réalisée dans les années quatre-vingt-dix, est conservée à Metz où elle a longtemps été exposée aux Musées de la Cour d'Or (Figure 162).

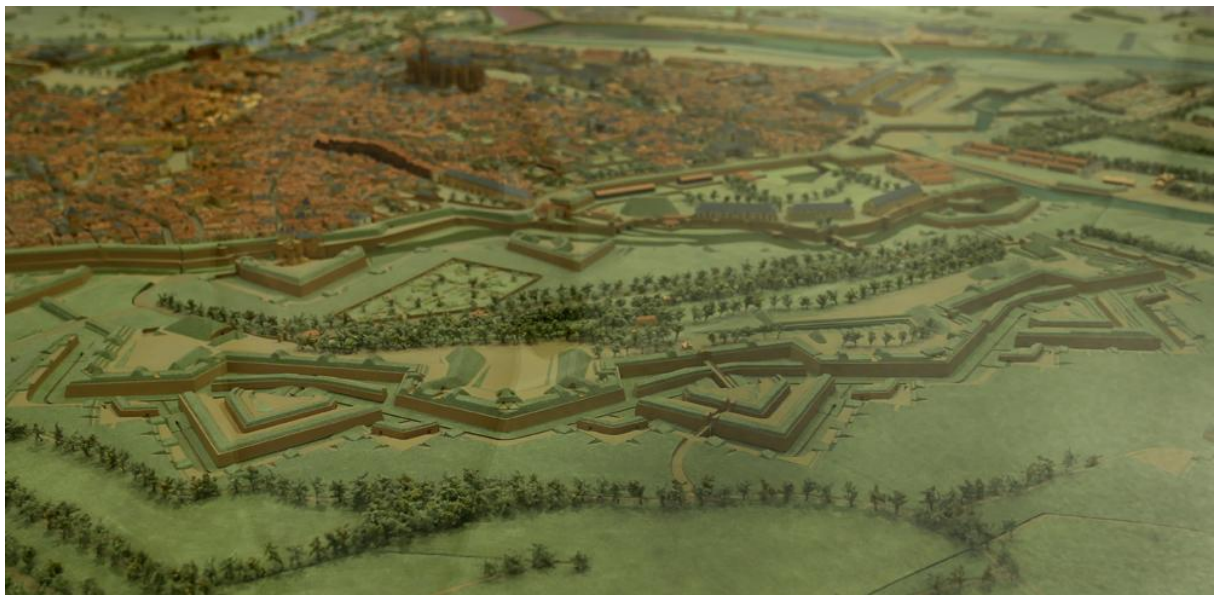


Figure 162. Détail de la copie réalisée entre 1990 et 1999 du plan-relief de Metz construit de 1821 à 1825 et mis à jour en 1868.
Photo : auteur

f) Le plan-relief de Neuf-Brisach

Construit	1706, restauré en 1782 et en 1936 de manière sommaire
Échelle	1/600
Dimensions	4,47 m x 2,23 m
Cahiers de développement	Aucun

Le plan-relief est réalisé pour préparer les travaux sur le terrain ; certaines des réalisations présentent sur le plan-relief n'ont jamais existé. Avec la restitution de Brisach (Breisach-am-Rhein) en 1697 par le traité de Ryswick, Louis XIV décide de verrouiller le Sud de l'Alsace sans défense entre Huningue et Strasbourg. Cela se traduit par la création d'une enceinte octogonale autour de laquelle sont démultipliés les ouvrages défensifs. Le projet repose sur une double enceinte : un rempart de sûreté équipé de courtines et de tours bastionnées à échauguettes, et un rempart de combat composé de bastions détachés, de large tenaille et de demi-lunes. Neuf-Brisach est l'exemple même de la ville neuve militaire avec son plan en damier articulé autour d'une place d'armes centrale et ses casernes standardisées. Unique exemple du troisième système de Vauban, Neuf-Brisach fait figure de « synthèse de toute l'œuvre fortifiée de Vauban ». En 1870, la place forte connaît son premier siège qui conduit à la destruction de la ville. Les fortifications, elles, ne présentent que peu de dégât malgré les bombardements.

Le plan-relief de Neuf-Brisach est une maquette prospective d'un des trois projets proposés par Vauban (Figure 163). Ville-neuve située sur terrain plat, le tracé de la place forte peut se développer de manière régulière. Seul exemple d'application du troisième système de Vauban, il en respecte les fidèlement les principes.



Figure 163. Détail du plan-relief de Neuf-Brisach construit en 1706.

Photo : RMN (Musée des Plans-reliefs) / René-Gabriel Ojéda RMNGP

g) Les plans-reliefs de Strasbourg

Construit	1830 à 1836, mis à jour de 1857 à 1863. Remplace un plan-relief exécuté entre 1725 et 1727 emporté par les Prussiens, puis rendu en 1903 à la ville de Strasbourg où il est exposé
Échelle	1/600
Dimensions	10,86 m x 6,65 m
Cahiers de développement	Conservés pour le plan-relief de 1836

Française depuis le traité de Nimègue, Strasbourg fait l'objet d'un projet de fortification par Vauban en 1681. L'enceinte médiévale qui avait reçu des bastions et un glacis est l'objet d'un important projet d'amélioration établi par Vauban qui prévoit une citadelle pentagonale équipée de cinq bastions, cinq demi-lunes à réduit, deux ouvrages à corne et d'une esplanade la séparant de la vieille ville. L'enceinte de Specklin est améliorée avec l'adjonction d'ouvrages à cornes, de contre-gardes et de ponts-écluses. Enfin, le fort détaché de Kehl, flanqué de deux ouvrages à cornes, est construit pour assurer de concert avec la citadelle le contrôle du gué et des ponts du Rhin. Cormontaigne démolit notamment les deux ouvrages à cornes de la citadelle pour les remplacer par un seul situé à l'est. Mais, c'est au cours du XIXe siècle que des modifications plus importantes sont conduites avec en particulier la suppression d'ouvrages extérieurs*.

Près de quatre plans-reliefs ont été exécutés pour la ville de Strasbourg, le nouveau remplaçant habituellement le précédent (Hatt, 2004). Le premier plan-relief (Figure 164, a) indique l'état de la place forte au début du règne de Louis XV, avant les modifications minimales réalisées par Louis de Cormontaigne tandis que toutes les modifications et aménagements (parmi lesquels le chemin de fer, la gare, l'usine à gaz, le pont de Kehl et le canal de la Marne au Rhin) initiées au XIXe siècle sont documentés par le second plan-relief réalisé en 1836, et mis à jour entre 1857 et 1863 (Figure 164, b).



Figure 164. Détails des plans-reliefs réalisés entre 1725 et 1727 (a) et entre 1830 et 1836 de la ville de Strasbourg.
Photos : auteur et RMN (Musée des Plans-reliefs) / René-Gabriel Ojéda, Stéphane Maréchalle

h) Le plan-relief de Toul

Construit	1846 et 1861, modifié en 1858 (ajout du chemin de fer) ; restaurée en 1966
Échelle	1/600
Dimensions	6,66 m x 5,83 m
Cahiers de développement	Conservés et numérisés en 2010

Toul figure parmi les 24 villes dont les enceintes sont essentiellement l'œuvre de Vauban ; c'est la seule dans ce cas en Lorraine. Les modifications apportées ultérieurement datent du XIXe siècle et les destructions sont dues aux conflits du XIXe et XXe siècles (Algrin, 1998). Les fortifications du XIIIe siècle sont modifiées par Vauban en 1678 et entre 1698 et 1705. Un premier projet conserve une partie des remparts médiévaux et prévoit un ouvrage à cornes ; il ne sera pas retenu. Le second projet fait table rase de l'existant et met en place un ennéagone régulier à neuf bastions, pourvu de sept demi-lunes, trois portes, des fossés secs, un glacis et un canal bordé d'arbres le long de la Moselle ; soit un tracé très proche du premier système théorique de Vauban. En 1722, rempart et parapet sont achevés. En 1741, les écluses et le canal sont à leur tour finis. Il faut attendre 1745 pour que la première demi-lune soit achevée. Placée en troisième ligne, la place de Toul semble de peu d'importance. Tout au long du XVIIIe siècle, des casernes sont bâties, notamment grâce à des dons de particuliers. Le projet de Vauban, faute d'investissement, n'est pas complété et pis, l'existant se dégrade. Avec l'annexion de la Moselle par les Allemands, la ville retrouve un statut de place de première ligne comme le démontrent les sièges de 1815 et de 1870.

Le plan-relief de Toul est l'un des derniers à avoir été construit. L'enceinte continue et quasiment régulière du fait de l'absence de relief ou d'une hydrographie importante.



Figure 165. Détail du plan-relief de Toul réalisé entre 1846 et 1861 et modifié en 1858 par l'ajout de la voie ferrée.
Photo : auteur

i) Le plan-relief de Verdun

Construit	1848 à 1856 ; restaurée en 1920 et 1965
Échelle	1/600
Dimensions	7,5 m x 7 m
Cahiers de développement	Conservés et numérisés en 2011

Rattachée à la France en 1648 par le traité de Westphalie, Verdun est dotée d'une citadelle selon le système d'Errard de Bar-le-Duc. Vauban apporte des améliorations en 1680 en renouvelant complètement l'enceinte qu'il avait consolidée en 1675 par l'ajout de demi-lunes. Il renforce la défense du grand rempart qui encerclait Verdun au Moyen-Âge en construisant notamment la demi-lune des Minimes reliées à l'enceinte par un batardeau. Au nord, Vauban projette un ouvrage avancé et il intègre le quartier Saint-Victor aux fortifications par le biais d'un ouvrage à cornes. La citadelle reçoit plusieurs aménagements : le bastion Vert est détaché, des cavaliers sont ajoutés aux bastions et les dehors sont renforcés par l'adjonction de tenailles et de contre-gardes (Boucon, 2007). Le XIXe siècle ne modifie que très peu Verdun, car seuls les chantiers engagés par Vauban sont achevés. Deux contre-gardes viennent flanquer les bastions tandis que l'enceinte continue programmée par l'ingénieur n'est toujours pas réalisée.



Figure 166. Détail du plan-relief de Verdun réalisé entre 1848 et 1856.

Photo : Musée des Plans-relief

Conclusion

Toul, Belfort et Neuf-Brisach, toutes trois des places fortes de la frontière Est ont une place particulière dans l'œuvre de Vauban. Toul est la seule cité de Lorraine où Vauban a pu appliquer le premier des trois systèmes de fortification qu'on a voulu voir dans ses réalisations. C'est une place qu'il a entièrement remaniée. Située dans une cuvette, la nouvelle enceinte de Toul a pu se développer de manière très régulière en étant ainsi très proche du tracé théorique à l'inverse d'autres places fortes où l'environnement et la présence de fortifications ont contraint l'ingénieur à tenir compte de l'existant. Belfort et Neuf-Brisach sont des étapes majeures dans l'évolution de la fortification bastionnée, car seuls représentants du deuxième et troisième système de Vauban.

Les plans-reliefs des villes de l'Est sont des modèles pertinents, car comme nous venons de l'établir, ils correspondent aux trois grands systèmes de Vauban. En cela, ils nous permettent d'illustrer le travail de l'ingénieur militaire. Ensuite, comme le montre notre classement préparatoire, les places fortes de Metz ou Verdun ont une topographie qui influence largement le tracé des fortifications et la complexité du processus de reconstruction virtuelle qui leur est associé. Le travail sur ces plans-reliefs est l'occasion d'étudier l'action du relief et de l'hydrographie sur les systèmes théoriques et donc de permettre d'explorer les combinaisons entre les systèmes et les propriétés topographiques.

Places fortes	Date de réalisation	Dates de mises à jour	Date de restauration	Nombres de table(s)	Surface moy. Par table (m ²)	Dimensions (m)	Surface (m ²)
Belfort	1755	1818	1948 et 1968	8	2,62	4,41 x 4,27	20,97
Bitche	1794	/	/	n.a.	n.a.	~5 x 4	~20
	1825-1828	/	1853	14	2,16	6 x 5,03	30,18
Huningue	1753	/	1770, 1804, 1920 et 1988-1990	1	3,76	1,88 x 2	3,76
Marsal	1834-1839	1859-1860	1925	15	2,11	6,57 x 4,82	31,67
Metz	1821-1825	1870-1879 et 1919-1920	1918 et 1964	30	2,31	9,22 x 7,5	69,15
	1990-1999	/	/	17	1,92	6,1 x 5,35	32,64
Neuf-Brisach	1703-1706	/	1782 et 1936	5	1,99	4,47 x 2,23	9,97
Strasbourg	1725-1728	/	/	23	3,46	12,26 x 6,5	79,29
	1830-1836	/	1852-1863	30	2,41	10,86 x 6,65	38,83
Toul	1846-1821	1858	/	24	1,62	6,66 x 5,83	38,83
Verdun	1848-1855	/	1920 et 1965	28	1,88	7,5 x 7	52,5
Moyenne*	1763	/	/	12,68	2,49	/	19,85

* moyenne réalisée sur l'ensemble de la collection

Tableau 9. Caractéristiques comparées des plans-reliefs de l'est de la France.
D'après : Musée des plans-reliefs, Musée de la Cours d'Or, Musée historique de Starasbourg

9) Hiérarchie des concepts de la fortification bastionnée

ouvrage fortifié

- |— *basse-cour*
- |— *baile*
- |— *bastillon*
- |— *braie*
 - |— *braie (simple)*
 - |— *fausse-braie*
- |— ouvrage de communication
 - |— *caponnière*
 - |— *caponnière (simple)*
 - |— *double caponnière*
 - |— *pas-de-souris*
 - |— *poterne*
 - |— *rampe*
 - |— *rue militaire*
 - |— *sillon / chemin de terre*
 - |— *pont-écluse*
 - |— *sortie de chemin couvert*
- |— ouvrage du corps de place / enceinte
 - |— *bastion*
 - |— *bastion à flancs couverts*
 - |— *bastion à flancs décrochés*
 - |— *bastion à flancs étagés*
 - |— *bastion à flancs brisés*
 - |— *bastion à tenaille*
 - |— ~~*bastion camus*~~
 - |— ~~*bastion composé*~~
 - |— *bastion détaché (3^e système)*
 - |— ~~*bastion difforme*~~
 - |— *bastion régulier*
 - |— ~~*bastion plat*~~
 - |— *bastion retranché à la gorge / plein*
 - |— *bastion ouvert à la gorge / vide*
 - |— *demi-bastion*
 - |— *double bastion*
 - |— *redan*
 - |— *redan (simple)*
 - |— *redan renforcé*
 - |— *tour bastionnée (3^e système)*
 - |— *courtine*
 - |— *courtine (simple)*
 - |— *courtine bastionnée*
 - |— *courtine retirée*
 - |— *orillon*
 - |— *guérite*
- |— ouvrage du fossé
 - |— *atardeau*
 - |— *cunette*
 - |— *dame*
 - |— *fossé*
- |— ouvrage extérieur
 - |— ouvrage du dehors
 - |— *contre-garde*
 - |— *demi-lune / ravelin*
 - |— *demi-lune (simple)*
 - |— *demi-lune à flanc*
 - |— *fer à cheval / pâté*
 - |— *ouvrage à cornes*
 - |— *ouvrage à cornes (simple)*

- |— ouvrage à cornes à double flancs
- |— ouvrage à couronne
 - |— ouvrage à couronne (simple)
 - |— ouvrage à double couronnes
- |— ouvrage à tenaille
 - |— bonnet de prêtre
 - |— queue d'hironde
 - |— ouvrage à tenaille (simple)
 - |— ouvrage à tenaille double
- |— lunette
 - |— tenaillon / grande lunette / contre-gardes
 - |— petite lunette
- |— tenaille
 - |— tenaille (simple)
 - |— tenaille à pans coupés
 - |— tenaille bastionnée
- |— ouvrage avancé
 - |— chemin couvert
 - |— chemin couvert (simple)
 - |— avant chemin couvert
 - |— glacis
 - |— glacis (simple)
 - |— avant-glacis
 - |— place d'armes
 - |— place d'armes saillante
 - |— place d'armes rentrante
 - |— redan / flèche / bonette
 - |— lunette
 - |— redan à flanc
 - |— redoute
- |— traverse
 - |— traverse dans le fossé
 - |— traverse des chemin couvert

édifice militaire

- |— arsenal
- |— caserne
 - |— *gendarmerie*
 - |— *quartier de cavalerie*
- |— citerne
- |— corps de garde
 - |— corps de garde (simple)
 - |— corps de garde avancé
- |— église
- |— hôpital
- |— poudrière
- |— puits

10)Algorithmes

Algorithme 1 : Tracer la trajectoire d'un front bastionné selon la méthode de De Ville¹⁰⁹

Début

Variables d'entrée :

A et B \leftarrow 2 points

n \leftarrow nombre de fronts

Instructions :

. $\overrightarrow{AK} = \overrightarrow{AB}/2$

. $[KO] \perp [AB]$ et

. $KO = \frac{AB}{2} \tan(\pi/n)$

. $\overrightarrow{AC} = \overrightarrow{AB}/6$

. $\overrightarrow{BD} = \overrightarrow{BA}/6$

. $[CE] \perp [AB]$ et $CE = AC$

. $[DF] \perp [AB]$ et $DE = DB$

. G \leftarrow le projeté orthogonal de E sur [AO]

. $JG = GE$

. G \leftarrow le projeté orthogonal de E sur [AO]

. $JG = GE$

Variables de sortie :

JECDFJ \leftarrow la trajectoire du front bastionné

Fin

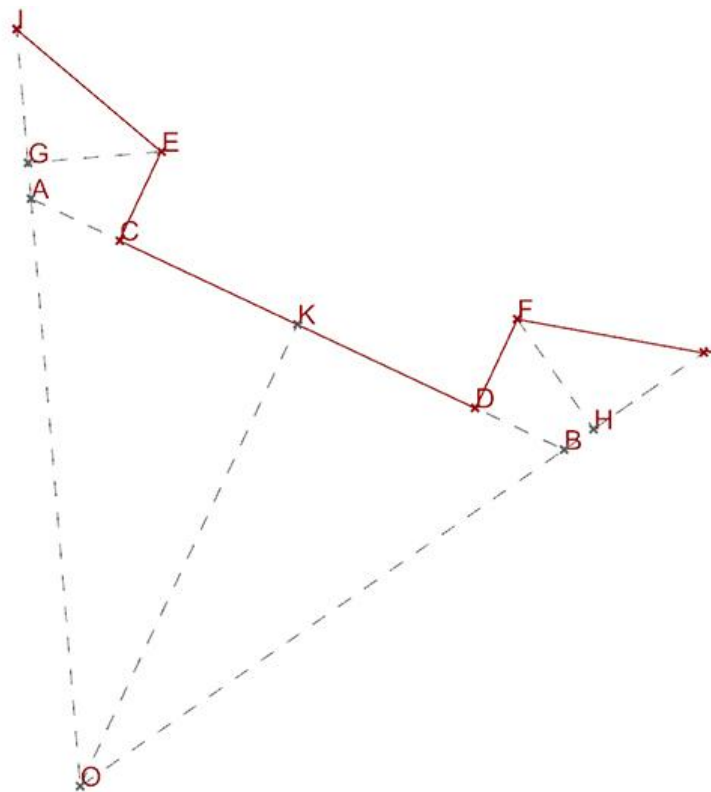


Figure 167. Construction de la trajectoire du rempart selon la méthode de De Ville.

¹⁰⁹ Méthode généralisée pour tous les polygones

Algorithme 2 : Tracer la trajectoire d'un front bastionné selon la méthode de Pagan

Début

Variables d'entrée :

A et B \leftarrow 2 points

Instructions :

- . $\vec{AC} = \vec{AB}/2$
- . [CD] \perp [AB] et
- . CD = 30 toises
- . [AE] // [AD]
- . [BF] // [BG]

Selon AB

200 :	AE = 60 toises BF = 60 toises
180 :	AE = 55 toises BF = 55 toises
160 :	AE = 50 toises BF = 50 toises

FinSelon

- . [DH] // [AD]
- . [DG] // [BD]

Selon AB

200 :	DH = 37 toises DG = 37 toises
180 :	DH = 32 toises DG = 32 toises
160 :	DH = 27 toises DG = 27 toises

FinSelon

Variables de sortie :

AEGHFB \leftarrow la trajectoire du front bastionné

Fin

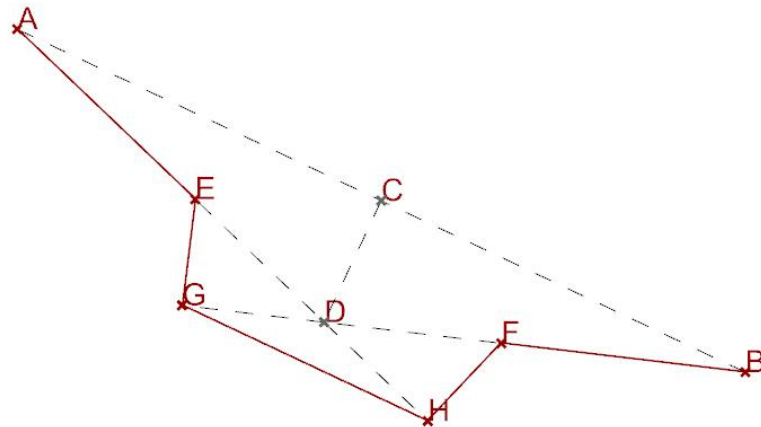


Figure 168. Construction de la trajectoire du rempart selon la méthode de Pagan.

Algorithme 3 : Tracer la trajectoire d'un front bastionné selon la méthode d'Allain Manesson Malet

Début

Variables d'entrée :

A et B \leftarrow 2 points

Instructions :

. $\overrightarrow{AK} = \overrightarrow{AB}/2$

. $[KO] \perp [AB]$ et $KO = \frac{AB}{2} \tan(\pi/n)$

. $[AC] \parallel [AO]$ et $AC = AB/3$

. $[BD] \parallel [BO]$ et $BD = AB/3$

. $\overrightarrow{AF} = \overrightarrow{AB}/5$

. $\overrightarrow{BE} = \overrightarrow{BA}/5$

. $\widehat{EFG} = 98^\circ$ et G est le point d'intersection de $[CE]$ et de $[FG]$

. $\widehat{FEH} = 98^\circ$ et H est le point d'intersection de $[DF]$ et de $[EH]$

Variables de sortie :

CGFEHD \leftarrow la trajectoire du front bastionné

Fin

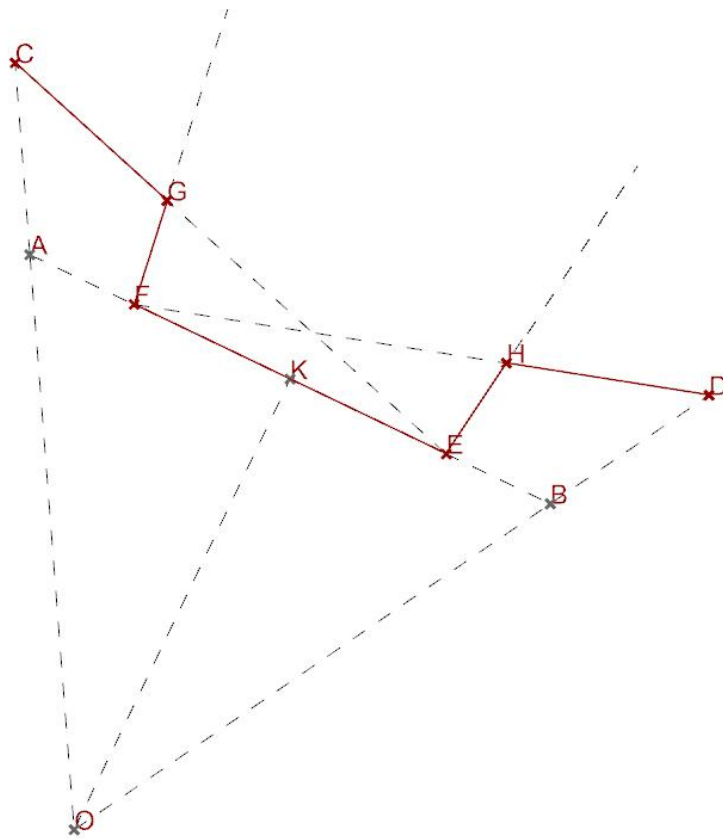


Figure 169. Construction de la trajectoire du rempart selon la méthode de Manesson Mallet.

Algorithme 4 : Tracer la trajectoire d'un front bastionné selon la méthode d'Errard :

Début

Variables d'entrée :

A et B : 2 points

Instructions :

. $\overrightarrow{AK} = \overrightarrow{AB}/2$

. $[KO] \perp [AB]$ et $KO = \frac{AB}{2} \tan(\pi/n)$

. $\widehat{OAF} = 45^\circ$

. $\widehat{OBE} = 45^\circ$

. $\widehat{OBF} = 22,5^\circ$

. $\widehat{OAE} = 22,5^\circ$

. F ← l'intersection de [BF] et [AF]

. E ← l'intersection de [AE] et [BE]

. C ← la projection orthogonale de E sur [AF]

. D ← la projection orthogonale de F sur [BE]

Variables de sortie :

ACEFDB ← la trajectoire du front bastionné

Fin

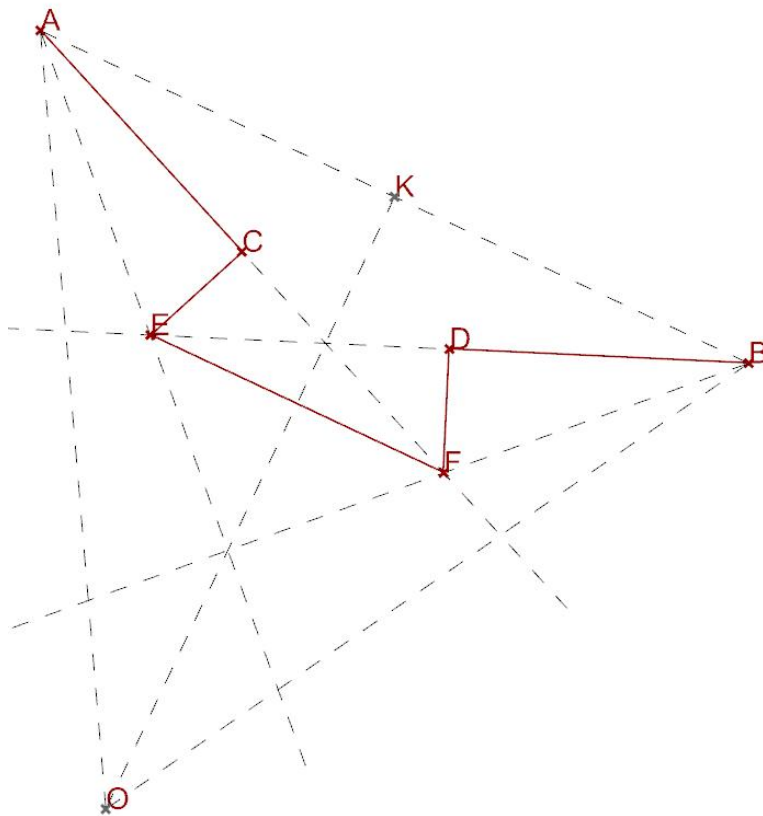


Figure 170. Construction de la trajectoire du rempart selon la méthode d'Errard.

11) Règles de constructions des ouvrages

CHAPITRE VI.

Construction d'un Quarré régulier.

DU point A comme centre, & d'une ouverture à volonté, décrivez un Cercle, lequel vous divisez en quatre parties égales aux points CDEB; & tirez des lignes au crayon d'un de ces points à l'autre, de même que du centre CDEB, auxquelles lignes vous ferez passer par-delà ces points. Divisez un de ces côtes de votre Quarré, tel que BC, en cinq parties égales, & portez une de ces cinq parties de part & d'autre des points DECB, comme BFCG; & ce sera la grandeur de vos demi-Gorges. Les trois autres parties restent pour la Courtine.

PLAN:
CH. VI.
Figure 1.

Cela étant fait, divisez un de ces côtes, comme BC, en trois, & portez cette troisième partie sur les quatre rayons prolongez, comme du point B au point H, & du point C au point I, & autres points DE de même; cela vous donnera les Capitales de vos Bastions.

ENSUITE tirez les Lignes de Défense au crayon GHFI; & pour avoir les Faces & les Flancs des Bastions, ouvrez le compas du point H au point G, & laissez une pointe en H, & portez celle qui est en G vers K; elle vous donnera le Flanc GK de 100. degrez avec la Courtine. Vous aurez aussi la Face KI. Transportez aussi cette même ouverture de compas du point I au point F, & la pointe du compas restant en I, portez l'autre de F en L; vous aurez aussi le Flanc FL, & la Face du Bastion LH. Faites de même à tous les autres côtes; vous aurez tous vos Bastions construits, de même que le Corps de la Place.

Figure 171. Règle de construction de l'enceinte selon Cormontaigne.

D'après: Cormontaigne, 1741

PROBLÈME V.

93. Tracer un flanc concave avec son orillon.

Le flanc étant la partie la plus essentielle de l'enceinte d'une place forte, on a toujours tâché d'augmenter sa défense, sa solidité, & de le cacher à l'ennemi,

dans du bastion, & on prendra sur ce prolongement DG , aussi de 5 toises. Ensuite des points G & H , chacun pris pour centre, & de l'intervalle GH , on décrira deux arcs qui se couperont dans un point L hors du bastion: de ce point pris pour centre, & du même intervalle GH , on décrira l'arc GPH , qui sera le flanc couvert que l'on nomme aussi flanc concave.

Si l'on fait les mêmes opérations sur tous les autres flancs des bastions de la place, on aura le plan tracé avec des bastions à flancs concaves & à orillons.

Chaque auteur a eu ses idées particulières pour y parvenir: celles de M. de Vauban, dont on va donner la construction, consistent à rendre concave une partie du flanc, & à couvrir cette partie de l'autre arrondie, ou en demi-cercle. Un flanc disposé de cette manière, se nomme flanc couvert, ou flanc concave & à orillon; on nomme orillon la partie qui est arrondie, & qui joint le flanc à la face du bastion.

Opération.

Il faut tracer au crayon le premier trait, ou la ligne magistrale de la place, par le premier problème. Ce trait étant tracé:

Pl. IX.
Fig. 3.

1°. On divisera le flanc CD en trois parties égales.

2°. Sur le milieu CI du tiers du flanc, vers l'épaule du bastion, on élèvera, en dedans du bastion, une perpendiculaire indéfinie OK ; & au point C , extrémité de la face BC , une autre perpendiculaire CK , qui coupera la première dans un point K . De ce point K pris pour centre, & de l'intervalle KC ou KI , on décrira un arc CI , qui donnera l'orillon CI .

3°. On posera la règle sur l'extrémité I de l'orillon CI , & sur le point A , sommet de l'angle flanqué du bastion opposé à DC (1). La règle restant dans cette position, on tirera la ligne IH en dedans du bastion, à laquelle on donnera 5 toises. Cette ligne se nomme le revers de l'orillon.

On prolongera la ligne de défense AD en dedans du bastion, & on prendra sur ce prolongement DG , aussi de 5 toises. Ensuite des points G & H , chacun pris pour centre, & de l'intervalle GH , on décrira deux arcs qui se couperont dans un point L hors du bastion: de ce point pris pour centre, & du même intervalle GH , on décrira l'arc GPH , qui sera le flanc couvert que l'on nomme aussi flanc concave.

Si l'on fait les mêmes opérations sur tous les autres flancs des bastions de la place, on aura le plan tracé avec des bastions à flancs concaves & à orillons.

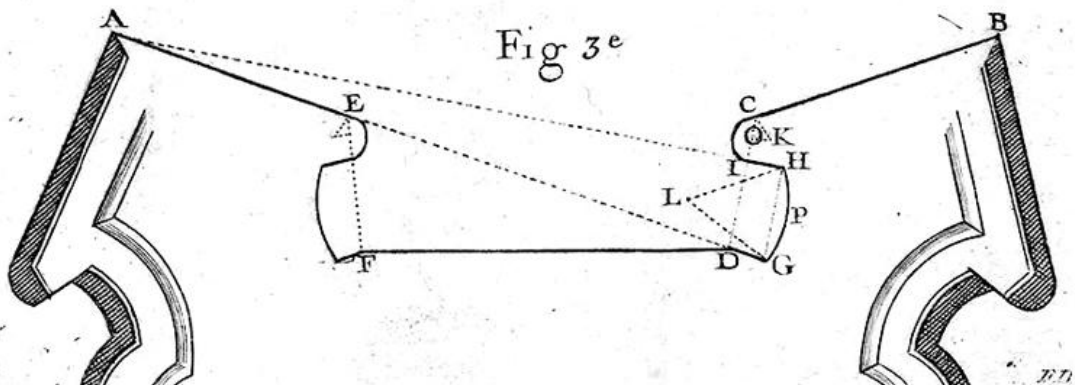


Figure 172. Règle de construction du flanc concave et de son orillon de Vauban selon Le Blond.
D'après: Le Blond, 1786

PROBLÈME III.

79. Tracer le fossé & le chemin couvert.

Pl. IX.
Fig. 1.

10. Pour tracer le fossé, il faut prendre avec le compas 18 ou 20 toises sur l'échelle du plan, mettre une de ses jambes sur le sommet A de l'angle flanqué, & décrire un arc EF vis-à-vis de cet angle, en dehors du bastion.

Il faut, du même intervalle de 18 ou 20 toises, & de l'angle flanqué B , décrire un arc CD , & ensuite poser la règle sur l'angle de l'épaule L & sur l'arc EF , en sorte que la ligne EML , tirée le long de la règle, soit tangente à l'arc EF au point E , c'est-à-dire, quelle touche cet arc sans le couper, & qu'elle aboutisse sur le sommet L de

l'angle de l'épaule ILB : on tirera de même la ligne CG , tangente à l'arc CD au point C , & aboutissant sur le point G . Ces deux lignes EL , CG , se couperont dans un point M , qui sera le sommet de l'angle rentrant EMC de la contreforce. On tracera de la même manière le fossé de tous les autres fronts de la fortification.

Comme les lignes EL , CG , se coupent dans un point M de la perpendiculaire élevée sur le milieu du côté AB , on doit se dispenser de les prolonger au-delà de ce point, jusqu'en L & en G .

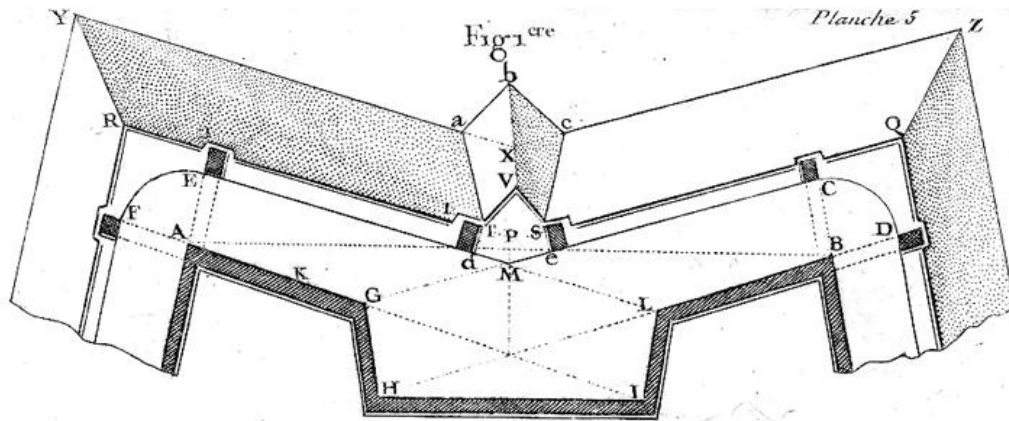


Figure 173. Règle de construction de l'ouvrage à corne devant un bastion de Vauban selon Le Blond.
D'après: Le Blond, 1786

PROBLÈME VI.

94. Tracer une tenaille & une caponniere.

La tenaille est un ouvrage construit sur les lignes de défense vis-à-vis les courtines. Cet ouvrage n'est pas plus élevé que le niveau de la campagne; au contraire, il est quelquefois plus bas de 2 ou 3 pieds, & couvert d'un parapet avec une ou deux banquettes.

La tenaille sert à augmenter la défense du fossé: les coups qui partent de cet ouvrage sont plus dangereux que ceux qui sont tirés des flancs de la place, parce qu'ils sont plus rasants & tirés de plus près. Elle a quelquefois des flancs, comme la tenaille *INOQPK*, Figure 1; dans ce cas on la nomme tenaille à flancs: quand elle n'a point de flancs, comme la tenaille *EMF*, Figure 2, on la nomme tenaille simple.

M. le Maréchal de Vauban, qui est l'inventeur de cet ouvrage, après s'être d'abord servi des tenailles à flancs, leur a préféré dans la suite les simples, parce que les flancs des premières peuvent être enfilés du rempart de la demi-lune; inconvénient qui ne se trouve point dans la tenaille simple: mais aussi son feu est fort oblique.

Pour construire la tenaille à flancs, il faut:

1°. Mener la ligne *GH* parallèle à la courtine *RS*, à la distance de 3 toises du revêtement.

2°. Mener les lignes *GI*, *HK*, parallèles aux flancs *RE*, *SF*, à la distance de 5 toises.

3°. Tirer les lignes de défense *AS*, *BR*; & du sommet *M* de l'angle flanquant, prendre de part & d'autre les lignes *MN*, *MP*, égales chacune à la moitié des lignes *MI*, *MK*; & ensuite des points *N* & *P*, abaisser des perpendiculaires *NO*, *PQ*, sur les lignes de défense *BR*, *AS*. Ces perpendiculaires feront les flancs de la tenaille, & les lignes *IN*, *PK*, en feront les faces; on tirera la ligne *OQ*, qui en fera la courtine.

4°. A 3 toises de distance du trait principal *INOQPK* de la tenaille, on lui mènera des lignes

parallèles pour déterminer son parapet. On donnera 6 toises au terreplein de la tenaille vis-à-vis les faces & les flancs: à l'égard de celui de la courtine, il sera terminé par la parallèle *GH*, pourvu qu'elle se trouve éloignée d'environ 3 toises du côté intérieur du parapet de la tenaille.

5°. Si la distance de *GH* à la courtine *OQ* est moindre que de 6 toises, ou, ce qui est la même chose, si le côté intérieur du parapet de cette courtine n'est pas éloigné de trois toises de la ligne *GH*, on mènera d'abord une parallèle à *GH*, à la distance de 3 toises, laquelle donnera le terreplein de la tenaille vis-à-vis sa courtine: ensuite on mènera une autre parallèle au-delà & à la même distance, qui terminera la longueur des flancs par sa rencontre avec les lignes *NO* & *PQ*, & qui sera le côté extérieur du parapet de la courtine.

6°. Il faut marquer une banquette à la tenaille comme au parapet du corps de la place. Il y en a ordinairement deux vis-à-vis les faces, parce que leur parapet est plus élevé que celui du reste de la tenaille, afin de mieux couvrir les flancs.

7°. On partage la tenaille en deux parties, par un petit fossé *MV*, pratiqué au milieu de sa courtine. Les deux parties de cet ouvrage communiquent ensemble par un petit pont qui les joint l'une à l'autre.

Pl. XIII.

Pl. XIII.

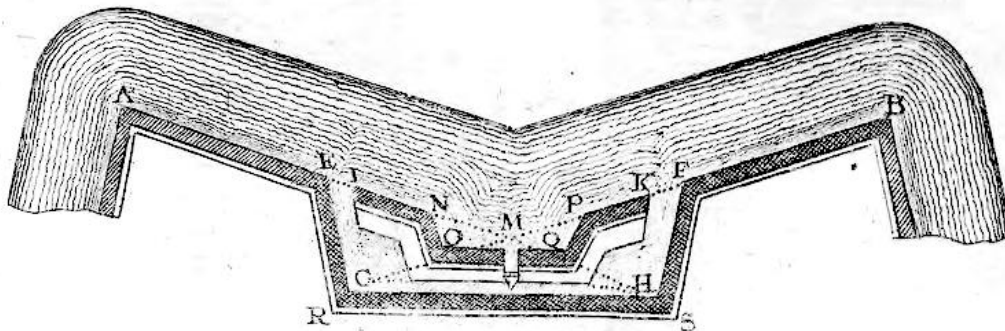


Figure 174. Règle de construction de la tenaille bastionnée de Vauban selon Le Blond.
D'après: Le Blond, 1786

95. *Construction de la tenaille simple.*

Il faut, comme dans la tenaille à flâncs, mener **pl. XIII**, une parallèle DC à la courtine AB , éloignée de 3 toises du côté extérieur du parapet; tirer les lignes de défense OB , PA , & mener les parallèles DE , CF aux flâncs AG , BH , à la distance de 5 toises; après quoi il ne s'agit plus que de mener des parallèles au trait principal EMF , à la distance de 3 toises de ce trait, pour avoir le côté intérieur du parapet de cette tenaille; & enfin des parallèles KV , VN , à la distance de 6 toises du côté intérieur de ce parapet, pour former le terreplein de cette tenaille. Elle sera terminée par les lignes KE , EM , MF , FN , NV . On la coupera en deux parties égales par un petit fossé fait vis-à-vis le point M , comme dans la tenaille à flâncs.

Lorsque les lignes KX , NY , qui terminent le terreplein de la tenaille, rencontrent la ligne DC dans des points X & Y un peu éloignés du milieu de cette ligne, la tenaille a sa partie du milieu RS parallèle à la ligne XY , ou à la courtine AB . On termine cette partie en menant une parallèle à la ligne XY à la distance de 3 toises, pour avoir le terreplein de la tenaille vis-à-vis la courtine; & à cette parallèle une autre parallèle aussi à la distance de 3 toises, pour déterminer l'épaisseur du parapet de cette partie: cette dernière parallèle donne le côté extérieur de la partie RS de la tenaille, c'est-à-dire, qu'elle coupe les lignes EM , MF , dans des points R & S qui terminent cette partie.

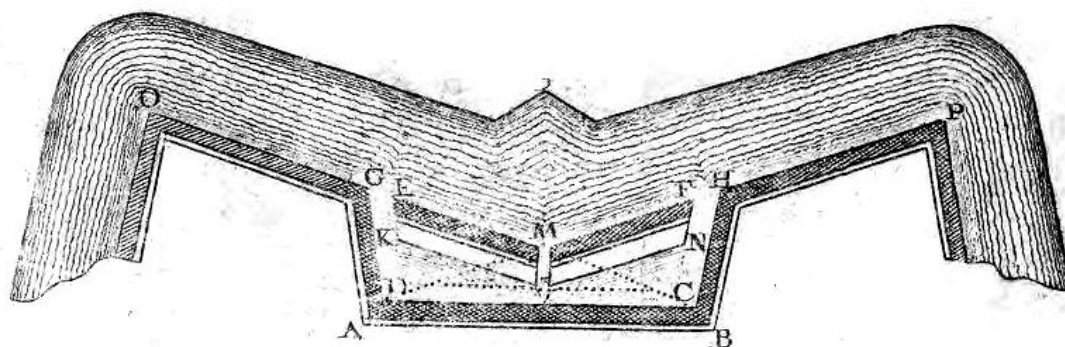


Figure 175. Règle de construction de la tenaille simple de Vauban selon Le Blond.
D'après: Le Blond, 1786

Pour la construction des dehors.

PROBLÈME I.

100. Construire une demi-lune.

La demi-lune \hat{LMN} , qu'on nommoit autrefois *ravelin*, est un ouvrage presque triangulaire construit vis-à-vis les courtines; il est composé de deux faces LM , MN , qui forment un angle saillant LMN vers la campagne, & de deux demi-gorges RL , RN , prises sur la contrescarpe de la place.

Pour construire une demi-lune vis-à-vis d'une courtine $3 F$, il faut marquer deux points O & P sur les faces $E 1$, $H 2$, des bastions qui accompagnent cette courtine, à 5 ou 6 toises de distance des angles de l'épaule E & H ; puis du point F , pris pour centre, & de l'intervalle FO , décrire un arc qui sera coupé par le prolongement de la perpendiculaire BR dans un point M , lequel sera le sommet de l'angle saillant de la demi-lune. Après cela, on tirera les lignes MO , MP , qu'on terminera à la contrescarpe, en L & en N ; l'on aura ML & MN qui seront les faces de la demi-lune, & LR , RN , les demi-gorges.

La ligne RM , tirée de l'angle rentrant R de la contrescarpe à l'angle saillant M de la demi-lune, se nomme *la capitale de la demi-lune*.

Le parapet & le rempart de la demi-lune se menent parallèlement à ses faces; savoir, le côté intérieur du parapet à 3 toises des faces en dedans de la demi-lune; le rempart, ou la ligne qui termine son terreplein, à 4 toises du côté intérieur du parapet, & enfin le talut du rempart à 2 toises & demie de son côté intérieur.

On construit une rampe dans le talut du rempart de la demi-lune, vis-à-vis son angle saillant. Elle se fait en menant de part & d'autre de cet angle, à la distance de 8 ou 10 pieds, une parallèle à la ligne qui termine le talut. On donne 15 toises à chacune de ces parallèles, & par leur extrémité, on tire des lignes au sommet de l'angle du terreplein du rempart. A 8 ou 10 pieds on mène une parallèle à chacune de ces lignes dans la largeur du talut, & la rampe se trouve ainsi construite.

H ij

On ne fait point de rempart à la gorge des dehors, ou à leur partie tournée vers la place, parce qu'il ne pourroit servir qu'à couvrir l'ennemi du feu de la place, lorsqu'il se seroit emparé de ces fortes d'ouvrages.

On donne 12 toises de largeur au fossé de la demi-lune; on mène sa contrescarpe parallèle à ses faces, jusqu'au fossé de la place. On l'arrondit vis-à-vis de l'angle saillant M , de la même manière que le fossé de la place, vis-à-vis les angles flanqués des bastions.

L'angle rentrant de la contrescarpe, ou de la gorge de la demi-lune, a ordinairement un enfoncement triangulaire, comme nous l'avons déjà observé, & tel qu'on le voit, *Planche XV*, aux demi-lunes 4 & 5 ; ou bien il est coupé par une ligne parallèle à la courtine. On doit, suivant l'Auteur de *l'Art de fortifier*, tirer cette ligne des points 1 & 2 , où le côté extérieur du polygone rencontre la gorge de la demi-lune (*Planche XVI*, *Fig. 6.*)

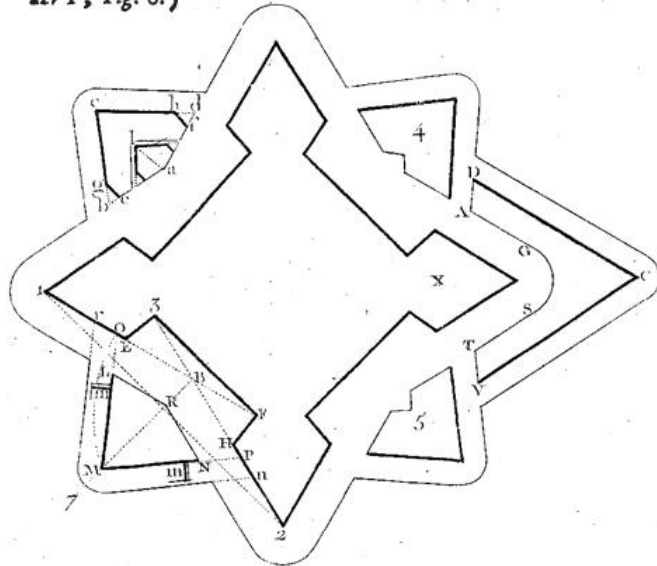


Figure 176. Règle de construction de Vauban pour la demi-lune de Vauban selon Le Blond.

D'après: Le Blond, 1786

PROBLÈME VII.

106. Construire un ouvrage à couronne devant un bastion.

On pourra construire un ouvrage à couronne devant un bastion, comme on vient de le faire devant une courtine. On prolongera pour cet effet la capitale du bastion, de 150 ou 160 toises, & l'on décrira de l'angle flanqué pris pour centre, & de cet intervalle, un arc indéfini, qui sera coupé en deux parties quelconques par le prolongement de la capitale. On portera sur cet arc, de part & d'autre, du point où il est coupé par cette ligne, un intervalle de 120 toises : les cordes de ces deux parties feront les côtés extérieurs de cet ouvrage. Les aîles s'aligneront à 15 ou 20 toises des angles de l'épaule du bastion. On achèvera ensuite la construction de cet ouvrage, comme celle du précédent, placé devant une courtine.

On observera que les angles flanqués des demi-bastions aient au moins 60 degrés. S'ils se trouvent trop aigus en alignant les côtés sur la face du bastion, on pourra les aligner sur les faces des demi-lunes collatérales, ou plutôt aux angles flanqués de ces demi-lunes.

On peut, dans ce cas, au lieu de 120 toises, en donner 160, & même 180 aux côtés extérieurs de cet ouvrage, sur-tout lorsqu'il est question de lui faire renfermer un grand terrain. Par-là, on rend les fronts de l'ouvrage à couronne susceptibles de la même défense que ceux de la place. On diminue, par cette construction, la longueur des branches de cet ouvrage; mais aussi la défense en devient fort oblique.

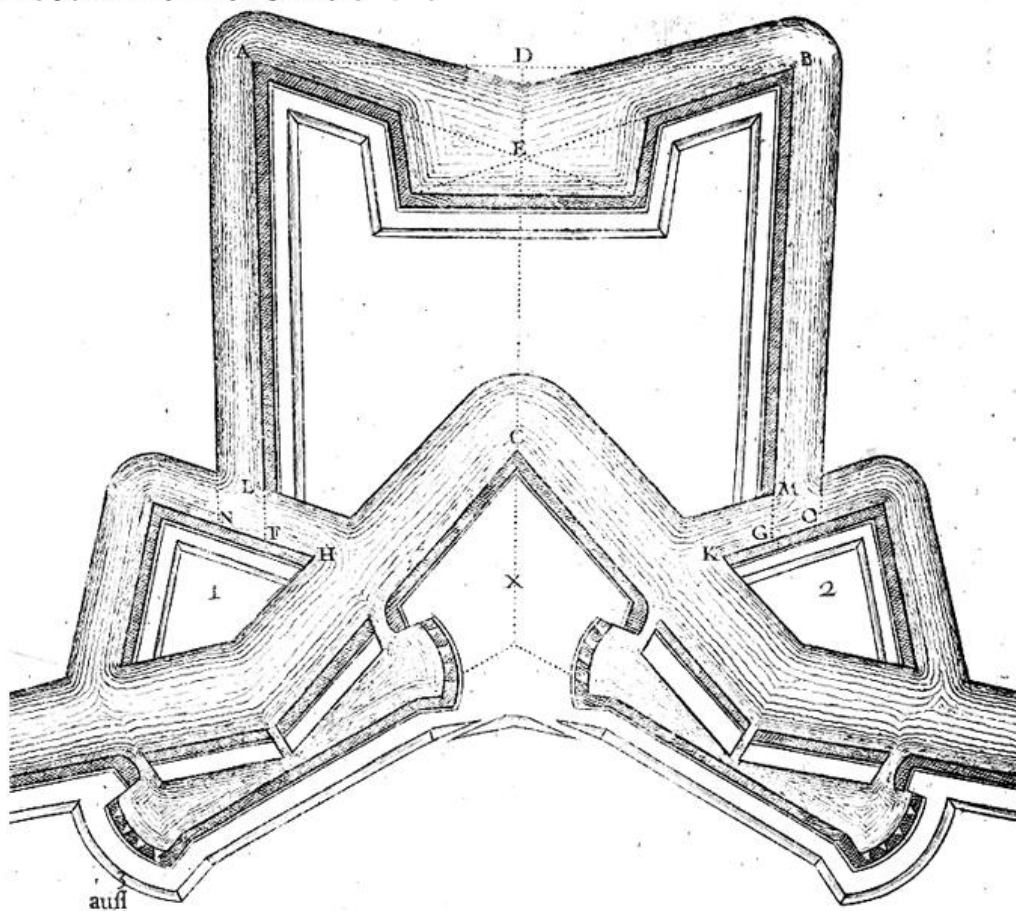


Figure 177. Règle de construction de l'ouvrage à corne devant un bastion de Vauban selon Le Blond.
D'après : Le Blond, 1786

Table des matières

Résumé	1
Remerciements.....	5
Sommaire.....	7
Introduction	11
Partie A. La numérisation de plans-reliefs	17
Chapitre I. Le patrimoine des plans-reliefs	19
I.1. Un exemple de la diversité du patrimoine : les plans-reliefs.....	19
I.1.a. Le contexte patrimonial : définitions	19
I.1.b. La maquette d'architecture : une représentation architecturale	21
I.2. Objectifs de la numérisation du patrimoine et des maquettes d'architecture.....	24
I.2.a. Enjeux de la numérisation du patrimoine culturel.....	24
I.2.a.a. Préservation du patrimoine par les technologies d'acquisition.	25
I.2.a.b. Communication et recherche	25
I.2.b. Objectifs de la numérisation de maquettes	26
I.3. Conclusion sur les maquettes et leur pouvoir de séduction.....	27
Chapitre II. Les approches pour le relevé tridimensionnel du patrimoine architectural	29
II.1. Les techniques d'acquisition actives et passives.....	30
II.2. La lasergrammétrie et la projection de lumière	32
II.2.a. La lasergrammétrie	33
II.2.a.a. Acquisition tridimensionnelle par mesure du temps de vol	33
II.2.a.b. Acquisition tridimensionnelle par triangulation	34
II.2.b. Projection de motifs	35
II.2.c. Démocratisation des techniques actives	36
II.3. La Photogrammétrie	37
II.3.a. Enjeux actuels.....	37
II.3.b. Évolutions récentes de la photogrammétrie	38
II.4. Choix d'une méthode pour la numérisation du patrimoine	40
II.4.a. Propriétés géométriques et de matériaux de l'objet étudié	42
II.4.b. Environnement de l'objet	42
II.4.c. Objectifs et moyens du projet	43
II.4.d. Bilan sur l'acquisition tridimensionnelle	44
Chapitre III. Rétroconception d'objets architecturaux.....	45
III.1. Origine de la rétroconception	46
III.2. Traitements préliminaires : consolidation, nettoyage et maillage.....	47
III.3. Segmentation des données	48
III.3.a. Segmentation géométrique	48
III.3.b. Segmentation sémantique	49
III.4. La modélisation paramétrique pour le patrimoine architectural.....	51
III.4.a. La reconstruction architecturale par modélisation paramétrique	51
III.4.b. La reconstruction architecturale par modélisation procédurale	53
III.4.c. Limites et perspectives des approches paramétriques et procédurales.....	54
III.5. Modélisation des connaissances architecturales.....	55
III.5.a. Schémas de classification pour l'organisation des connaissances	56
III.5.b. Les modèles de données en conception pour l'architecture	57
III.5.c. Les ontologies dérivées des approches BIM et SIG pour la reconstruction virtuelle	58
III.6. Bénéfices de la rétroconception appliquée au patrimoine	59
III.6.a. Optimisation géométrique	59

III.6.b. Enrichissement sémantique.....	60
Chapitre IV. Échantillon de projets de numérisation de plans-reliefs	63
IV.1. Création de modèles virtuels de la Rome antique.....	65
IV.1.a. Le projet Plan de Rome de Bigot	66
IV.1.b. Rome Reborn – <i>Plastico di Roma antica</i>	67
IV.1.c. Convergence des deux projets.....	68
IV.2. Virtual Leodium – <i>La cité de Liège vers 1730</i>	69
IV.3. Le projet Nantes 1900	70
IV.4. PRAM, Le Projet Relief Auguste Magnin (Genève)	72
IV.5. La maquette virtuelle de Langweil (Prague)	73
IV.6. La maquette virtuelle d’Hambourg.....	74
IV.7. Les reliefs de paysages suisses	75
IV.8. Autres projets de numérisation de maquettes	77
IV.8.a. Les projets de numérisation de plans-reliefs	77
IV.8.a.a. Les plans-reliefs virtuels par Google Earth.....	77
IV.8.a.b. Restitution vidéo de la place forte de Marsal	78
IV.8.a.c. Projet de numérisation des plans-reliefs de Saint-Omer et d’Aire-sur-la-Lys.....	79
IV.9. Résultats des projets de numérisation de maquettes	81
IV.9.a. Particularités des maquettes lors de l’acquisition tridimensionnelle.....	81
IV.9.b. Modélisation 3D des fortifications bastionnées.....	82
Partie B. Reconstruction des fortifications de plans-reliefs.....	87
Chapitre I. La collection des plans-reliefs de Louis XIV	89
I.1. Les plans-reliefs et les fortifications bastionnées.....	89
I.1.a. Contexte historique initial et le tracé des frontières	89
I.1.b. L’évolution des es plans-reliefs et des fortifications.....	91
I.1.c. Caractéristiques de la collection et techniques de construction.	94
I.2. La collection aujourd’hui	96
Chapitre II. Proposition d’une approche basée sur les connaissances pour la reconstruction des plans-reliefs : le cas des fortifications bastionnées.....	99
II.1. Automatisation de la reconstruction paramétrique des bâtiments présents sur les plans-reliefs.....	99
II.2. Introduction à la rétroconception des fortifications des plans-reliefs.....	100
Chapitre III. Acquisition tridimensionnelle de plans-reliefs	107
III.1. Facteurs influents l’acquisition tridimensionnelle des plans-reliefs	107
III.2. Première session d’acquisition – plan-relief de Toul.....	110
III.3. Seconde session d’acquisition – plans-reliefs de Toul et Strasbourg.....	112
III.4. Bilan de l’acquisition de données tridimensionnelles de plans-reliefs	113
Chapitre IV. Les traités d’architecture militaire et la modélisation de connaissances	115
IV.1. Traités et fortification bastionnée	115
IV.1.a. Traités d’architecture classique.....	116
IV.1.b. La fortification bastionnée et ses systèmes	117
IV.1.c. Approche historique des traités d’architecture militaire.....	118
IV.1.d. Conclusion.....	119
IV.2. Choix des traités	120
IV.2.a. Les réserves émises par Vauban sur les traités	120
IV.2.b. L’influence de Vauban.....	120
IV.2.c. Conclusion sur les traités de fortification	122
IV.3. Organisation des connaissances dans les traités de fortification	122
IV.3.a. Le problème des définitions.....	123
IV.3.b. Les maximes et les systèmes	123
IV.3.c. La géométrie	125
IV.3.d. Les trois systèmes de Vauban	128

IV.3.e. Standardisation et modularité des édifices militaires	129
IV.4. Modélisation de la connaissance sur la fortification bastionnée	130
IV.4.a. Classification hiérarchique des ouvrages	130
IV.4.b. Conséquences sur la modélisation géométrique	132
IV.4.c. Les ouvrages à trajectoires	133
IV.4.c.a. La trajectoire	134
IV.4.c.b. Le profil	137
IV.4.c.c. La gorge	138
IV.4.d. Traités de fortification bastionnée et modèle de connaissance	138
Chapitre V. Prototype et expérimentation pour la reconstruction des fortifications des plans-reliefs.....	139
V.1. Prototypage sur Grasshopper	140
V.1.a. Manipulation et génération de données	140
V.1.b. Structure des données	142
V.2. Implémentation et expérimentations des trajectoires théoriques des ouvrages de fortification bastionnée.....	144
V.2.a. La génération de trajectoires théoriques	145
V.2.b. Front bastionné	145
V.2.c. Chemin couvert.....	155
V.2.d. Tenaille	157
V.2.e. Demi-lune	160
V.2.f. Ouvrage à corne	163
V.3. Ajustement manuel des trajectoires des ouvrages précédents à des données extérieures ...	166
V.4. Extraction automatique des données nécessaires à la reconstruction des ouvrages de fortification.	169
V.4.a. Segmentation des données relevées avec des logiciels existants	170
V.4.b. Segmentation sémantique des trajectoires des ouvrages	173
V.4.b.a. Opération A. Création de côtés extérieurs approximatifs	177
V.4.b.b. Opérations B et B'. Définition d'une surface englobant la trajectoire de l'ouvrage	178
V.4.b.c. Opération C. Extraction d'un lot de segments appartenant à la surface englobant la trajectoire	180
V.4.b.d. Opération 1. Création des trajectoires des ouvrages	181
V.4.b.e. Opération 2. Création d'un segment unique à partir de segments indifférenciés	183
V.4.b.f. Opération D. Définition d'une surface englobant la ligne	184
V.4.b.g. Opération E. Extraction d'un lot de segments appartenant à la surface englobant les segments	185
V.4.b.h. Opération F. Définition d'une variable de dimension et sélection des segments	186
V.4.b.i. Opération G. Définition d'une variable de position et intersection	187
V.4.b.j. Opération H. Création d'un segment unique	188
V.5. Résultats de l'extraction des trajectoires	190
V.6. Reconstruction des trajectoires et ajustements finaux	199
V.7. Bilan et perspectives pour le prototype.....	201
V.7.a. Les ouvrages à trajectoire.....	202
V.7.b. Reconstruction du relief : le balayage des profils.....	202
V.7.c. Les autres ouvrages de fortification.....	203
V.7.d. Les autres plans-reliefs.....	203
Conclusion.....	207
Bibliographie	213
Index.....	233
Annexe	235
1) Lexique.....	235
a) Ensembles fortifiés	235

b) Ouvrages fortifiés	235
i) Communications.....	236
ii) Corps de place	236
(1) Bastions.....	236
(2) Courtines	237
iii) Ouvrages du fossé.....	238
iv) Ouvrages extérieurs.....	238
(1) Ouvrages du dehors	238
(2) Ouvrages avancés.....	240
v) Autres ouvrages.....	240
c) Autres ouvrages.....	242
d) Édifices militaires.....	242
e) Éléments de topographie	243
f) Concepts généraux	243
i) Principe	243
ii) Tir	244
g) Tracés notables	244
i) Front	244
ii) Partie d'ouvrage	244
iii) Angles et lignes	245
2) Comparaison des représentations d'un algorithme sur quatre éditeurs de programmation visuelle.....	248
3) Tables du plan-relief de Toul	252
4) Carte représentant les principales interventions de Vauban.....	253
5) Les vagues de publication de traités de fortification.....	254
6) Ouvrage à trajectoire	255
7) Modèle de connaissance de la fortification bastionnée	256
8) Les plans-reliefs de Lorraine et d'Alsace.....	258
a) Le plan-relief de Belfort.....	259
b) Le plan-relief de Bitche.....	260
c) Le plan-relief de Huningue.....	261
d) Le plan-relief de Marsal	262
e) Les plans-reliefs de Metz	263
f) Le plan-relief de Neuf-Brisach	264
g) Les plans-reliefs de Strasbourg	265
h) Le plan-relief de Toul.....	266
i) Le plan-relief de Verdun	267
9) Hiérarchie des concepts de la fortification bastionnée.....	269
10) Algorithmes	271
11) Règles de constructions des ouvrages.....	275
Table des matières.....	283
Table des illustrations.....	287
Table des tableaux et diagrammes	296

Table des illustrations

Figure 1. Représentation du patrimoine matériel et immatériel dans les cinq régions définies par l'UNESCO.	20
Figure 2. Quelques exemples de maquettes de villes à différentes échelles :	22
Figure 3. Photographie d'un bâtiment abritant des turbines au pied du barrage de Caban Coch, Pays de Galle.	27
Figure 4. Comparaison des techniques d'enregistrement de données 3D en fonction de la taille de l'objet étudié et de sa complexité géométrique (point/objet).	30
Figure 5. Classification des principales techniques d'acquisition tridimensionnelle. Dans ce chapitre, seules les techniques sans contact sont abordées et plus particulièrement la photogrammétrie rapprochée pour les techniques passives et la lasergrammétrie pour les techniques actives.	31
Figure 6. Principaux domaines du spectre électromagnétique (rayons γ , X, ultraviolets, lumière, infrarouges, et ondes radio) avec les fréquences et longueurs d'onde correspondantes.	32
Figure 7. Même si par observation directe le maillage issu de la photogrammétrie apparaît davantage bruité (b) que le maillage issu du capteur laser (a), la comparaison des maillages (à droite) ne présente pas d'écart majeur.	39
Figure 8. Quelques exemples de maquettes de villes et des instruments mis en œuvre pour leur numérisation :	41
Figure 9. Comparaison des maillages obtenus par capteurs laser (a) et par photogrammétrie (b). À l'échelle de maquettes, les cœurs d'îlots provoquent des erreurs dans les relevés laser ou photogrammétrique assimilables à celles provoquées par la présence de trous dans l'objet d'étude.	42
Figure 10. Recommandation sur le taux d'échantillonnage requis en fonction de la taille des éléments étudiés.	43
Figure 11. Principe de la rétroconception	46
Figure 12. Mise en œuvre d'un processus de rétroconception pour le projet de reconstruction virtuelle de Cluny III. À partir des données relevées (a), un modèle paramétrique est ajusté (b) pour permettre une reconstruction virtuelle de Cluny III (c) exploitable dans un projet de « plateforme collaborative interdisciplinaire, dite SIG 4D ».	47
Figure 13. Une consolidation est nécessaire à la fusion en un seul maillage des cinq relevés effectués à une résolution de 0,5 mm de l'îlot 23 du plan-relief de Toul (b) alors qu'il ne couvre une surface que d'une vingtaine de centimètres carrés.	48
Figure 14. Un nuage de points (a) représentant un bâtiment de corps de garde sur une demi-lune du plan-relief de Toul et son maillage obtenu par polygonisation (b).	48
Figure 15. Segmentation avec le logiciel Geomagic Studio d'un collecteur d'admission numérisé. Le maillage a été automatiquement analysé et segmenté en fonction d'une typologie d'objets géométriques prédéfinis : plan, extrusion, etc.	49
Figure 16. Création d'une voûte à partir d'un nuage de points qui a été segmenté manuellement pour permettre la création de courbes servant à générer une surface (<i>loft</i>). Des traitements sont encore nécessaires pour faire de la surface une instance d'objet architectural de type voûte.	49
Figure 17. Ajustement d'objets paramétriques de la bibliothèque d'Autodesk Revit à partir des données d'un nuage de points. Quatre murs courbes issus d'une bibliothèque métier sont ajustés après sélection du groupe de points pertinents.	50

Figure 18. Comparaison de quatre représentations abstraites qui définissent le programme pour la création d'une surface à partir de courbes (« <i>loft</i> ») sur Grasshopper (a), Generative Component (b), Houdini (c) et Dynamo (d) (des captures en grands formats sont disponibles en annexe).	53
Figure 19. Grammaire de formes comprenant huit règles de formes (a) et application des règles pour la création d'un bungalow (b).	54
Figure 20. Vue en éclatés d'une représentation tridimensionnelle d'un étage d'immeuble au format IFC (a) et CityGML (b). Les modèles partagent des concepts communs à l'image des objets <i>ifcWallStandarCase</i> et <i>WallSurface</i> ou <i>IfcSlab</i> et <i>FloorSurface</i>	58
Figure 21. Réplique virtuelle de Prague (a) et maquette de Prague de Langweil (b).	63
Figure 22. La reconstruction virtuelle d'une maquette pour la création d'un modèle 3D concerne la plupart des projets présentés dans la suite de cette étude. Le modèle 3D est avant tout un modèle d'une maquette qui représente une ville dans un état qui lui est contemporain ou antérieur.....	64
Figure 23. Évocation virtuelle de Rome (a) et la maquette <i>Plastico di Roma antica</i> (b).	64
Figure 24. Le modèle 3D peut également être un modèle d'une ville qui est représentée en maquette. La maquette est une des sources d'information pour ces projets de restitution ou d'évocation virtuelle. Elle permet de visualiser l'état d'une ville qui peut être contemporain ou antérieur à la maquette. La maquette peut également permettre de déduire l'état d'une ville à un état postérieur à la sa réalisation lorsqu'elle est confrontée à d'autres sources.	65
Figure 25. Détail de la maquette de Paul Bigot (a) et restitution virtuelle d'un des portiques du forum d'Auguste dans son état du I ^{er} siècle ap. J.-C (b).....	67
Figure 26. Détail de la maquette de Gismondi (a) et mise en place du capteur à triangulation (b) pour la numérisation VIVID 910 (Konica Minolta).....	68
Figure 27. À partir des données numérisées, des polyèdres sont créés et importés dans le modeleur procédural (a) pour la création automatique de modèles respectant à la fois le style architectural induit par les règles de constructions prédéfinies et les dimensions issues de relevés (b). Le résultat est une évocation virtuelle de Rome (c).	68
Figure 28. Détails de la maquette <i>La cité de Liège vers 1730</i>	69
Figure 29. Exploitation de la maquette numérique de <i>La cité de Liège vers 1730</i> dans ArcGIS.	70
Figure 30. Photographies du prototype de l'application finale.....	71
Figure 31. Détail de la maquette (a) et acquisition tridimensionnelle (b) par capteur laser à triangulation REVscan (Creaform).	71
Figure 32. Détail du <i>Relief Magnin</i> (a) et numérisation par capteur à lumière structurée (b).	72
Figure 33. Interface du SIG avec l'intégration de la version numérique du <i>Relief Magnin</i> et l'affichage en simultanée de notices d'informations relatives aux objets sélectionnés dans la représentation 3D.	73
Figure 34. Reconstruction virtuelle de la maquette de Prague (a) et capture d'écran de l'interface du modèle virtuel de la maquette de Langweil (b).	74
Figure 35. Photographie de la maquette de la ville d'Hambourg.	75
Figure 36. Le Relief de la Suisse (a) centrale de Franz Ludwig Pfyffer von Wyher et le dispositif d'acquisition photogrammétrique (b).	76
Figure 37. Le Fort Griffon tel qu'il apparaît sur le plan-relief de Besançon (a) et le modèle virtuel réalisé par Google Earth (b). La géométrie et les textures du modèle virtuel présentent de nombreuses incohérences, notamment pour la végétation.	78
Figure 38. Détail du plan-relief de Marsal (a) et captures vidéo (b et c) du film « Essai de restitution de la place forte de Marsal à l'époque de Vauban ».	79
Figure 39. Détails des plans-reliefs de Saint-Omer (a) et d'Aire-sur-la-Lys (b).	80

Figure 40. Capture photo du film de présentation de la reconstruction virtuelle du plan-relief d'Aire-sur-la-Lys par la société Ingeo.	80
Figure 41. Frontières françaises en 1642 (a) et en 1714 (b). Les hachures représentent les nouveaux territoires.	90
Figure 42. Principales places fortes (□), enceintes ou forts (●) construits ou modifiés (▼) par Vauban à la frontière nord-est (la carte complète est en annexe, page 251).	92
Figure 43. Principe d'étagement des feux : Le glacis et le chemin couvert (A) sont couverts par la demi-lune (B) et par l'enceinte principale (c). Les ouvrages sont ouverts du côté de la ville pour les battre par le feu en cas de prise par l'ennemi.	93
Figure 44. Les plans-reliefs de Brest (a) et de Cherbourg (b), d'une superficie respective de 130m ² et de 160m ² , exposés à la Nef du Grand Palais à Paris en 2012.	94
Figure 45. Vue des neuf tables du plan-relief de Besançon (a) et la même maquette de 26,7m assemblée et exposée au Grand Palais (b).	94
Figure 46. Extraits du cahier de développement D du plan-relief de Toul représentant les élévations développées et le plan de l'îlot 18.	95
Figure 47. Détail de l'extrait du cahier de développement D du plan-relief de Toul représentant les élévations développées et le plan de l'îlot 18.	95
Figure 48. Nombre de plans-reliefs par plage de surface (m ²).	96
Figure 49. Répartition de la collection des plans-reliefs.	97
Figure 50. Chaque plan-relief sur lequel a été expérimentée notre proposition a fait l'objet d'une numérisation (a) selon des techniques différentes, mais qui résultent toutes en l'obtention de nuages de points (b) qui permettent d'obtenir des maillages (c).	100
Figure 51. Quelques planches du traité d'Allain Manesson Mallet illustrant l'importance de la géométrie, de la nomenclature et des règles de construction des ouvrages de fortifications en plan et en coupe. La troisième planche montre le dessin du front bastionné de l'enceinte. ...	101
Figure 52. La plupart des différents ouvrages de fortification bastionnée peuvent être construits par le balayage d'un profil le long d'une trajectoire à l'image du front (a) ou du chemin couvert et du glacis (b).	102
Figure 53. Principales étapes de l'approche KASToR. À partir de l'acquisition tridimensionnelle (1), et de l'ontologie qui a été établie grâce à l'étude des traités de fortification (2), il est possible de reconstruire les différentes trajectoires supports des opérations géométriques de balayage à l'origine de la plupart des ouvrages de fortification. L'implémentation des différents algorithmes de reconstruction et les expérimentations prennent place sur Grasshopper (3). Dans un premier temps manuelle (a et b), la reconstruction des trajectoires est ensuite assurée automatiquement par le biais d'opérations de segmentation sémantique (c). Ces dernières opérations sont développées dans la partie V.4.b : Segmentation sémantique des trajectoires des ouvrages, page 171.	105
Figure 54. Les bas-reliefs, comme le bas-relief (18 mètres x 3,50 mètres) du pilier Ouest de l'Arc de Triomphe de l'Étoile à Paris, présentent des caractéristiques proches des plans-reliefs quant à leur numérisation : occlusions, masques, etc.	107
Figure 55. Détails du plan-relief de Toul. La photographie n'était pas destinée à une utilisation en photogrammétrie, mais elle met en avant les enjeux liés à cette technique. Ainsi, la zone de netteté de la photographie est réduite : ici, elle ne dépasse pas une bande d'une quinzaine de centimètres. On constate également la présence de végétation qui masque les détails les plus fins de l'ouvrage de fortification et notamment les banquettes de tir. Enfin, la présence de poussière, comme le trahit la trace sur l'unique bâtiment représenté, atténue le contraste du cliché.	109
Figure 56. Dimensions des tables 1 et 4 du plan-relief de Toul avec les parties numérisées hachurées (a) et maillage d'une partie des fortifications bastionnées du plan-relief de Toul obtenue par relevé laser (b). Les occlusions sont nombreuses du fait de la présence de	

végétation, ce qui se traduit par les nombreux trous dans le maillage. La Figure 153 en annexe présente une vue de dessus des tables 1 et 4 du plan-relief de Toul.	111
Figure 57. Nuage de points d'une partie de la ville de Toul obtenu par stéréophotogrammétrie avec Photomodeler Scanner (a). Malgré l'ajout de photographies supplémentaires, le logiciel ne parvient pas à générer des données exploitables. La reconstruction manuelle par photomodélisation des fortifications (b) permet de sélectionner les données à relever, mais l'opération est longue et nécessite de nombreuses interprétations par l'utilisateur.	111
Figure 58. Comparaison des maillages de la demi-lune 47 du plan-relief de Toul obtenus par 123D Catch et capteur laser. L'écart type entre les deux géométries est très faible, de l'ordre de 0,5mm.	112
Figure 59. Maillages de la demi-lune 47 du plan-relief de Toul obtenus par 123D Catch (a) et par capteur laser (b). Parmi les défauts des deux relevés, notons la présence d'arêtes de congé pour les deux techniques. Les trous apparents dans le relevé laser correspondent à des surfaces dont la couleur de surface ne permet pas le renvoi d'information (le noir notamment) ou à des objets à la géométrie trop morcelée comme les arbres qui peuvent aussi agir comme des masques.	113
Figure 60. Maillage obtenu par 123DCatch (a) et détail du plan-relief de Strasbourg au niveau d'une demi-lune (b).	113
Figure 61. Chacun des maillages représente l'angle sortant d'un ouvrage de fortification de type demi-lune (a). Maillages issus de la numérisation des plans-reliefs de Strasbourg, photogrammétrie 123D Catch (a), de Marsal, capteur laser à triangulation Vivid 910 de Konica Minolta (b) et de Toul, capteur laser à triangulation EXAscan de Creaform (d).	114
Figure 62. Planches illustrant les cinq ordres classiques (a) et le tracé du chapiteau corinthien (b).	116
Figure 63 Quelques éléments de fortification bastionnée : face (a), courtine (b), flanc (c), fossé (d), flanc à orillon (e), tenaille (f), parapet (g), caponnière (h), flanc (i), face (j), demi-lune (k), glacis (l), cunette (m), place d'armes (n), traverse (o).	118
Figure 64 Le travail sur le flanquement réciproque des différentes parties d'un front bastionné permet d'aboutir au tracé de Pagan qui sera repris par Vauban (les carrés rouges signalent la présence d'un angle droit).	119
Figure 65 Principe du flanquement des faces d'un bastion b grâce aux flancs des bastions opposés a et c. Les lignes de défense en pointillé figurent la portée effective de l'artillerie qui est chargée de flanquer les faces du bastion.	124
Figure 66. Quelques exemples de systèmes de fortification sur des maquettes théoriques : .	126
Figure 67. Règles de construction pour le tracé de la magistrale de Pagan telles qu'énoncées par Alain Mannesson Mallet dans son traité.	127
Figure 68. Interprétation des règles de construction pour le tracé de la magistrale de Pagan telles qu'énoncées par Alain Mannesson Mallet.	127
Figure 69 Coupe devant une courtine : « Les feux des deux flancs se croisent devant la courtine »	128
Figure 70 Systèmes théoriques attribués à Vauban et exemples d'application sur les villes de Strasbourg (a), Belfort (b) et Neuf-Brisach (c) à travers leurs plans-reliefs respectifs.	129
Figure 71. Élévation et plan d'une caserne avec le pavillon des officiers (a) et la caserne Binot de Mont-Dauphin construite après 1700.	130
Figure 72. Principaux groupes d'ouvrages fortifiés.	131
Figure 73. Classement partiel des ouvrages de fortification bastionnée : les ouvrages fortifiés (a) et les édifices militaires (b). Une version plus exhaustive est présentée en annexe, page 267.	132
Figure 74. L'embrasure est une ouverture pratiquée dans un parapet pour permettre le tir. .	133

Figure 75. Diagramme de classe UML synthétisant les différents objets nécessaires à la modélisation 3D d'un ouvrage à trajectoire	134
Figure 76. Les différentes têtes d'ouvrages rencontrées : front bastionné (a), le front tenaillé (c) et le bastion (c). Le tracé 1 en rouge matérialise la portion de trajectoire appartenant à la tête d'ouvrage tandis que le tracé 2 en bleu correspond à la portion appartenant aux ailes de l'ouvrage. Ailes de l'ouvrage et têtes de l'ouvrage forment la magistrale ou la trajectoire du point de vue de la modélisation géométrique.....	135
Figure 77. Diagramme UML décrivant les différents objets nécessaires à la construction de la trajectoire des ouvrages.	136
Figure 78. Tracé régulateur d'une place théorique (a) et ordre de construction des trajectoires des différents ouvrages (b).	136
Figure 79. Diagramme UML décrivant les différents objets nécessaires à la construction du profil des ouvrages à trajectoire.	137
Figure 80. Différente configuration pour l'extrémité du balayage en fonction du tracé de la gorge : en angle rentrant (a), en angle sortant (b) ou droit (c).	138
Figure 81. Principales étapes de l'approche KASToR. Dans un premier temps manuelle (a et b), la reconstruction des trajectoires est ensuite assurée automatiquement par le biais d'opérations de segmentation sémantique (c).	139
Figure 82. Le composant ' <i>Loft</i> ' est une opération de création de surface à partir de courbes. Des options (entrée O) permettent entre autres d'ouvrir (f) ou de fermer (g) la surface créée.	141
Figure 83. Algorithme Grasshopper permettant la création d'un point C dont la position, au milieu ou au tiers d'un segment [AB], est définie par la longueur de ce dernier.	141
Figure 84. Organigramme de programmation décrivant l'algorithme présenté dans la Figure 83.	142
Figure 85. De haut en bas : composants de visualisation de Grasshopper permettant différentes représentations des listes de données. De gauche à droite :	143
Figure 86. Création d'un nouveau composant Grasshopper (' <i>cluster</i> ') qui permet, à partir de deux points, de créer un point dont la position, entre A et B, dépend de la distance de ces points.	144
Figure 87. Dans les premiers temps de l'approche KASToR, les trajectoires théoriques (a) ainsi que leurs paramètres d'ajustement (b) sont implémentés et testés pour valider ces algorithmes qui seront utilisés lors du processus de segmentation pour l'automatisation de la reconstruction (c).	145
Figure 88. La double couronne de Moselle, la double couronne de Belle-Croix à Metz (a), des ouvrages avancés à Huningue (b) et un ouvrage à corne à Strasbourg (c) peuvent être construit à l'aide du composant trajectoire de front.	146
Figure 89. Règle de construction de l'enceinte de Vauban selon Le Blond.	147
Figure 90 Tracé du front bastionné selon la première méthode de Vauban telle qu'elle est rapportée par Guillaume le Blond.	148
Figure 91. Programme de création du tracé de la trajectoire d'un front bastionné selon la première méthode de Vauban et sa réduction sous la forme d'un ' <i>cluster</i> '	149
Figure 92. Trajectoires théoriques de fronts implémentées dans Grasshopper. Les surfaces grisées permettent de comparer le tracé de Vauban (a) avec celles de Pagan (b), Errard (c), de Ville (d), Mallet (e) et Cormontaigne (f). Dans chaque cas, seuls les points A et B ont été placés manuellement.	150
Figure 93. La valeur moyenne des angles de la ligne polygonale (a) permet de déterminer l'ordre du polygone parent (b) et ainsi de calculer la longueur de l'apothème de chaque segment de la ligne polygonale (c).	151
Figure 94. Construction de la trajectoire du front selon la méthode de Cormontaigne.	153

Figure 95. Création de fronts à orillons sur un front bastionné selon la méthode de Vauban telle qu'elle est rapportée par Guillaume Le Blond.	155
Figure 96 Création du fossé et de la contrescarpe sur un front bastionne selon la méthode de Vauban telle qu'elle est rapportée par Guillaume le Blond.	156
Figure 97. Une tenaille simple sur le plan-relief de Lille.	157
Figure 98. Création d'une tenaille sur un front bastionné selon la méthode de Guillaume le Blond.	158
Figure 99. Une tenaille bastionnée sur le plan-relief de Huningue devant un rempart dont les flancs sont pourvus d'orillons.	158
Figure 100. Création d'une tenaille à flanc et son fossé sur un front bastionné selon la méthode de Guillaume le Blond.	159
Figure 101. Une demi-lune à flanc sur le plan-relief de Toul.	160
Figure 102 Création d'une demi-lune à flancs et son fossé sur un front bastionné selon la méthode de Guillaume Le Blond.	162
Figure 103. Un ouvrage à corne sur le plan-relief de Strasbourg.	163
Figure 104 Création d'un ouvrage à corne devant un bastion, de son fossé et de son escarpe selon la méthode de Guillaume Le Blond.	165
Figure 105. Les paramètres communs aux différentes méthodes de construction ont été identifiés comme paramètres d'ajustement. Les plages de valeurs communément rencontrées sont précisées.	167
Figure 106. Le premier paramètre contrôle l'angle formé par les faces et le côté extérieur par l'intermédiaire d'une perpendiculaire dont on peut varier la longueur (a). Le second paramètre contrôle la longueur des faces en fonction de la longueur du côté extérieur (b). Le dernier paramètre contrôle la position du sommet formée par la courtine et les flancs (c) par rapport à la longueur du segment reliant le sommet du bastion opposé à l'angle de l'épaule.	167
Figure 107. Composants d'ajustement de la trajectoire d'un front théorique et de ses flancs à orillons avec les paramètres communs aux différentes méthodes de construction. Les paramètres, visibles à gauche, sont doublés afin de contrôler le côté gauche et le côté droit des trajectoires du front et des orillons et ainsi permettre un ajustement optimal sur les données relevées (le front 0 du plan-relief de Strasbourg). Lorsque la même valeur est affectée aux deux côtés, un des deux paramètres peut être supprimé (les paramètres orangés).	168
Figure 108. Les opérations manuelles de reconstruction (a et b) permettent de reconstruire précisément les trajectoires des ouvrages de fortification, mais pour accroître la vitesse et la précision de la reconstruction, une automatisation de la reconstruction est proposée (c).	169
Figure 109. Le maillage utilisé pour l'opération de segmentation (a) doit être dépourvu de géométries aberrantes telles que les trous de petite taille ou les pics formés par des triangles qui peuvent se croiser comme c'est le cas de la végétation des plans-reliefs (b). De plus, la suppression de ces géométries oblige l'utilisateur à intervenir dans la phase de prétraitement des données relevées pour reconstruire les parties masquées par la végétation.	170
Figure 110. Segmentation de la géométrie des bâtiments sur Geomagic.	171
Figure 111. Reconstruction de la géométrie sur Geomagic. Des régions sont identifiées d'après la direction des normales composant leurs facettes (a). Les régions sont ensuite qualifiées en fonction des types de surfaces présentes dans la bibliothèque du logiciel (b) avant qu'il n'ajuste automatiquement une surface unique pour chaque région (c).	172
Figure 112. L'opération A permet, à partir du maillage des fortifications de Strasbourg (a) d'obtenir des lots de segments (b en gris) ainsi que les côtés extérieurs des différents fronts (b, en rouge et numéroté de 0 à 2).	173
Figure 113. L'opération B. Définition d'une surface englobant la trajectoire du front permet de créer des surfaces englobant les segments formant les trajectoires des fronts (a). De	

ce lot restreint de segments, l'opération 1. Création de la trajectoire des ouvrages permet d'identifier et de reconstruire les trajectoires des ouvrages à l'image du front (b).....	174
Figure 114. Paramètres pour chacune des trajectoires d'ouvrages selon le rang de l'ouvrage étudié. Le front (a, continu rouge), ouvrage de rang 0 ne s'appuie que sur le tracé du côté extérieur (a, en pointillé rouge) pour être construit. La tenaille et la demi-lune (b, continu rouge), ouvrages de rang 1, nécessitent le front (b, en pointillé rouge) pour être tracées tandis que le chemin couvert (c, continu rouge), ouvrage de rang 2, a besoin des trajectoires du front et de la demi-lune (c, en pointillé rouge) pour être construit.	175
Figure 115. Courbes de niveau des fortifications bastionnées du plan-relief de Marsal à partir du maillage issu du relevé laser.....	177
Figure 116. Définition d'une surface englobant (en bleu) la trajectoire réelle d'un front à partir de la trajectoire théorique du même ouvrage (en pointillés).	178
Figure 117. Les surfaces englobant (en bleu) les trajectoires réelles de la tenaille et de la demi-lune sont réalisées à partir des trajectoires théoriques (en pointillés) implémentées dans la bibliothèque d'objets paramétriques.	179
Figure 118. Regroupement d'un lot de segments (en vert) appartenant à la surface englobant la trajectoire du front parmi le lot initial de segments (en rouge).	180
Figure 119. Définition d'une surface englobant la ligne de type Face (en bleu).	184
Figure 120. : Segments extraits de l'intersection de la surface et des segments du lot initial.	185
Figure 121. Définition d'une variable de dimension et sélection des segments (en vert) à partir du lot précédent. Les segments écartés au terme de l'opération figurent en rouge.....	186
Figure 122. Définition d'une variable de position (pointillé) pour l'intersection du lot de segments à retenir (vert) parmi.....	187
Figure 123. Ajustement d'une ligne unique (en vert) sur le lot initial (en rouge).	189
Figure 124. Raccordement des faces de fronts mitoyens. Les faces originales (en rouge) sont raccordées au niveau de la capitale pour créer une trajectoire continue de front en front (en vert).	190
Figure 125. Comparaison des trajectoires obtenues par le composant trajectoire théorique du front, de la tenaille et de la demi-lune (en bleu) et par segmentation automatique des mêmes trajectoires (en rouge). Aucun tracé n'a été ajusté manuellement. Front 0 du plan-relief de Strasbourg.....	191
Figure 126. Comparaison des trajectoires obtenues par le composant trajectoire théorique du front et de la demi-lune (en bleu) et par segmentation automatique des mêmes trajectoires (en rouge). Aucun tracé n'a été ajusté manuellement. Front 4 du plan-relief de Marsal.	192
Figure 127. Zone tampon autour d'un tracé référence pour déterminer la précision d'un nouveau tracé au niveau d'un orillon.	192
Figure 128. Tenaille de Toul (a, courbes rouges) et demi-lune de Marsal (b, trajectoire segmentée rouge).....	193
Figure 129. Trajectoire du front 1 de Strasbourg reconstruit après segmentation à une précision de 93,87% pour une zone tampon de 3,3 mm.	196
Figure 130. Trajectoire du front 2 de Marsal reconstruit après segmentation à une précision de 97,07% pour une zone tampon de 3,3 mm.	197
Figure 131. Trajectoire de la tenaille simple 2 de Strasbourg reconstruit après segmentation à une précision de 93,33 % pour une zone tampon de 3,3 mm.....	198
Figure 132. Trajectoire de la demi-lune à flanc 2 de Strasbourg reconstruit après segmentation à une précision de 90,09 % pour une zone tampon de 3,3 mm.	199
Figure 133. Composants d'ajustement de la trajectoire d'un front segmenté et de ses flancs à orillons.....	200

Figure 134. Composants nécessaires aux ajustements fins de la trajectoire segmentée de la tenaille simple.	201
Figure 135. Composants nécessaires aux ajustements fins de la trajectoire segmentée de la demi-lune à flanc.	201
Figure 136. Composant de balayage avec ses paramètres : tracé de la trajectoire, tracé du profil et tracé de la gorge.....	203
Figure 137. Les magasins à poudre (cercles rouges) dans les lots de segments obtenus à partir des maillages de Strasbourg (a) et de Marsal (b).	204
Figure 138. Principaux groupes d'ouvrages fortifiés.	235
Figure 139. Double caponnière.	236
Figure 140. Bastion plein (haut) et ouvert (bas).....	237
Figure 141. Bastion à tenaille.....	237
Figure 142. Une tour bastionnée (A) et son bastion détaché (B).	237
Figure 143. Une couronne (A), une corne (B), une corne couronnée (C), une corne à double flanc (D) et un bonnet-de-prêtre (E).....	239
Figure 144. Un ouvrage à tenaille (A), une queue d'hironde (B) et une tenaille double (C).	239
Figure 145. Une lunette.	240
Figure 146. Éléments constituant l'embrasure.....	241
Figure 147. Niveau de sol (en poillé rouge) sur deux profils de fortification (la campagne est à gauche, la place à droite).	246
Figure 148. Lignes et angles principaux recensés lors de l'analyse des traités de fortification.	247
Figure 149. Création d'une surface par une opération de <i>loft</i> sur Houdini.	248
Figure 150. Création d'une surface par une opération de <i>loft</i> sur Generative Component... ..	249
Figure 151. Création d'une surface par une opération de <i>loft</i> sur Grasshopper.....	250
Figure 152. Création d'une surface par une opération de <i>loft</i> sur Vasari pour Revit.....	251
Figure 153. Table 1, dite table de ville, et table 4 du plan-relief de Toul. L'ensemble de la maquette est composé de vingt tables représentant une surface totale d'environ 39m ² (6,66 x 5,83 m)	252
Figure 154. Principales places fortes (□), enceintes ou forts (●) construits ou modifiés (▼) par Vauban.	253
Figure 155. Frise chronologique représentant quelques uns des auteurs de traités de fortification selon la date de publication de l'ouvrage.	254
Figure 156. Diagramme de classes UML décrivant la modélisation des ouvrages à trajectoire.	255
Figure 157. Diagramme de classe UML représentant les ouvrages de fortification bastionnée et leurs relations.	257
Figure 158. Détails du plan-relief de Belfort (a), réalisé en 1755 et mis à jour en 1818, et d'un plan de Belfort daté de 1780 (b).....	259
Figure 159. Détail du plan-relief de Bitche construit entre 1825 et 1828 et mis à jour en 1852.	260
Figure 160. Détail du plan-relief construit en 1753 de la place forte d'Huningue.	261
Figure 161. Détail du plan-relief de Marsal construit en 1839 et mis à jour en 1860.....	262
Figure 162. Détail de la copie réalisée entre 1990 et 1999 du plan-relief de Metz construit de 1821 à 1825 et mis à jour en 1868.	263
Figure 163. Détail du plan-relief de Neuf-Brisach construit en 1706.....	264
Figure 164. Détails des plans-reliefs réalisés entre 1725 et 1727 (a) et entre 1830 et 1836 de la ville de Strasbourg.....	265
Figure 165. Détail du plan-relief de Toul réalisé entre 1846 et 1861 et modifié en 1858 par l'ajout de la voie ferrée.....	266

Figure 166. Détail du plan-relief de Verdun réalisé entre 1848 et 1856.....	267
Figure 167. Construction de la trajectoire du rempart selon la méthode de De Ville.....	271
Figure 168. Construction de la trajectoire du rempart selon la méthode de Pagan.....	272
Figure 169. Construction de la trajectoire du rempart selon la méthode de Manesson Mallet.	273
Figure 170. Construction de la trajectoire du rempart selon la méthode d'Errard.	274
Figure 171. Règle de construction de l'enceinte selon Cormontaigne.....	275
Figure 172. Règle de construction du flanc concave et de son orillon de Vauban selon Le Blond.	276
Figure 173. Règle de construction de l'ouvrage à corne devant un bastion de Vauban selon Le Blond.	277
Figure 174. Règle de construction de la tenaille bastionnée de Vauban selon Le Blond.	278
Figure 175. Règle de construction de la tenaille simple de Vauban selon Le Blond.....	279
Figure 176. Règle de construction de Vauban pour la demi-lune de Vauban selon Le Blond.	280
Figure 177. Règle de construction de l'ouvrage à corne devant un bastion de Vauban selon Le Blond.	281

Table des tableaux et diagrammes

Tableau 1. Techniques de numérisation laser utilisée dans le patrimoine architectural.	36
Tableau 2. Structure générale des objets architecturaux (« <i>architectural features</i> »). Des objets de niveau n sont des composants d'objets de niveau supérieur à n. Dans cette classification, chaque objet à une dimension matérielle et une dimension vide.	55
Tableau 3. Schémas de classification selon leur niveau de formalisme.....	57
Tableau 4. Caractéristiques comparées de numérisation de maquettes précédemment présentées.	83
Tableau 5. Caractéristiques comparées de projets de numérisation de plans-reliefs précédemment présentées.....	84
Tableau 6. Pourcentage de correspondance entre le tracé obtenu par segmentation et le tracé une fois ajusté avec une zone tampon de 3,3 mm sur la maquette.	194
Tableau 7. Pourcentage de correspondance entre le tracé obtenu par segmentation et le tracé une fois ajusté avec une zone tampon de 1 mm sur la maquette.	194
Tableau 8. Pourcentage de correspondance entre le tracé obtenu par segmentation et le tracé une fois ajusté avec une zone tampon de 0,1 mm sur la maquette.	195
Tableau 9. Caractéristiques comparées des plans-reliefs de l'est de la France.....	268
Diagramme 1. Diagramme d'activité UML représentant les opérations principales nécessaires à la segmentation sémantique et à la reconstruction des trajectoires des différents ouvrages de fortifications bastionnées.....	176
Diagramme 2. Détail de l'opération de création des trajectoires des ouvrages (1).....	182
Diagramme 3. Détail du processus de création d'un segment unique à partir de segments indifférenciés (2). Les différentes opérations sont détaillées dans les parties suivantes : C en partie V.4.b.e, D en partie V.4.b.g, E en partie 0, F en partie V.4.b.i et G en partie V.4.b.j.	183

Numérisation et restitution virtuelle des maquettes de la collection de Louis XIV : le cas des fortifications bastionnées

Résumé :

La numérisation des plans-reliefs est un enjeu important pour la préservation de la centaine de maquettes de la collection, mais aussi pour la valorisation des anciennes places fortes françaises. Nous proposons ainsi une rétroconception des plans-reliefs appliquée aux fortifications bastionnées. L'approche KASToR (Knowledge based Approach: from Scale Model To 3D Replica) a pour centre une ontologie de la fortification bastionnée élaborée à partir de traités d'architecture militaire. Une bibliothèque d'objets paramétriques a ensuite été implémentée dans Grasshopper, un outil de programmation visuelle, afin de segmenter sémantiquement les relevés pour y ajuster automatiquement les ouvrages de fortification paramétriques. Notre proposition permet ainsi d'optimiser et de corriger la géométrie, mais également d'enrichir sémantiquement les données relevées, conditions auxquelles doivent répondre dorénavant les modèles 3D pour leur intégration dans des systèmes d'information.

Mots clés : Patrimoine, Plans-reliefs, Fortifications bastionnées, Acquisition tridimensionnelle, Réplique virtuelle, Rétroconception, Segmentation, Modélisation paramétrique.

Digitizing and reconstruction of the scale models of the collection of Louis XIV: The case of the bastioned fortifications

Abstract :

The digitizing of plans-reliefs is a critical issue for the preservation of the one-hundred scale models of the collection but also for valorization of the ancient French strongholds. Hence, we propose a reverse engineering of the plans-reliefs applied on the bastioned fortification. The KASToR approach (Knowledge based Approach: from Scale Model To 3D Replica) is based on an ontology of bastioned fortification which has been created thanks to treatises of military architecture. Then, a library of parametric objects is implemented in Grasshopper, a visual programming tool, in order to segment the surveys for the automatic adjustment of the parametric fortification works. Our proposal allows the geometrical correction and optimization but also the semantic enhancement of raw data, which are the conditions that now must be met by 3D models for their integration in information systems.

Keywords: Cultural heritage, Plans-reliefs, Bastioned fortifications, 3-dimensional digitizing, Digital replica, Reverse engineering, Segmentation, Parametric modeling.