

Ecole Nationale d'Architecture de Nancy  
Université Henry Poincaré (Nancy 1)  
Institut National Polytechnique de Lorraine

Mémoire de Master Design Global, spécialité  
**"Architecture Modélisation Environnement"**

Modélisation Paramétrique  
de plans-reliefs datant du XIXe siècle



B. PITARD  
Laboratoire d'accueil: CRAI  
Sous la direction de : C. CHEVRIER  
Septembre 2011

**SOMMAIRE :**

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
1.1 Contexte.....	4
1.2 Les Plans reliefs.....	4
1.3 Le plan relief de Toul.....	5
<b>2. PROBLEMATIQUE.....</b>	<b>7</b>
2.1 Enjeux.....	7
2.2 Travail effectué.....	8
<b>3. APPROCHES EXISTANTES.....</b>	<b>9</b>
3.1 Restitution de plans-relief.....	9
3.1.1 Le plan relief de Prague.....	9
3.1.2 Le plan relief de Rome.....	10
3.2 Modélisation paramétrique.....	11
3.3 Modélisation de fortifications.....	12
<b>4. PRINCIPE DE LA METHODE.....</b>	<b>13</b>
4.1 Récolte de données.....	13
4.2 Modélisation théorique.....	13
4.3 Test sur le réel.....	14
4.4 Modification de la théorie et adaptation sur le réel.....	15
<b>5. ANALYSE ET MODELISATION .....</b>	<b>16</b>
5.1 Eléments maçonnés des dehors.....	18
5.1.1 Tenailles.....	18
5.1.2 Cas particulier de la tenaille de Toul.....	20

5.1.2 Demi-lune.....	21
5.1.3 Contre-garde.....	24
<b>5.2 Les fossés.....</b>	<b>26</b>
5.2.1 La cunette.....	26
5.2.2 Talus et traverses.....	27
<b>5.3 Chemin couvert et glacis.....</b>	<b>29</b>
<b>5.4 Modélisation globale suivant la méthode front par front.....</b>	<b>32</b>
<b>5.5 Principe général.....</b>	<b>34</b>
<b>6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>36</b>
<b>6.1 Conclusion.....</b>	<b>36</b>
6.1.1. Cas non traités.....	36
6.1.2 limite de la méthode.....	38
<b>6.2 Perspectives.....</b>	<b>40</b>
<b>7. ANNEXES.....</b>	<b>42</b>
<b>8 LEXIQUE.....</b>	<b>51</b>
<b>8. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>53</b>
<b>9. TABLE DES FIGURES.....</b>	<b>55</b>

# 1. INTRODUCTION

Ce travail de recherche s'est déroulé dans le cadre d'étude du laboratoire FRE-CRAI, dans le domaine de la conception par ordinateur et la modélisation de la morphologie architecturale et urbaine. L'imagerie de synthèse et les problématiques liées au patrimoine complètent les activités du laboratoire.

## 1.1 Contexte

Le programme national de numérisation du patrimoine culturel initié par le ministère de la culture et de la Communication vise à la fois à préserver les pièces d'une trop forte exposition directe au public tout en favorisant la diffusion des données récoltées par le biais d'internet. Ces données pourront être exploitées pour des usages variés de découverte et de connaissance du patrimoine culturel, des usages de loisir, soit pour des professionnels pour des usages de recherches, de connaissance scientifique, ou pour des usages spécifiques au tourisme, à l'éducation artistique et culturelle.

## 1.2 Les plans reliefs

Les plans-reliefs furent utilisés aux 17ème et au 18ème siècles majoritairement à des fins militaires. Ils permettaient ainsi aux ingénieurs de visualiser la morphologie des places fortes, d'amorcer les projets de fortification, ou même d'élaborer des stratégies militaires de sièges, ou de défenses. Ces plans de ville constituent une immense ressource documentaire permettant de comprendre et d'appréhender l'état de nombreuses villes dont la morphologie a, au fil des deux derniers siècles, été totalement bouleversée. Ils ne concernent cependant que les villes d'importance militaire stratégique, (frontière de l'époque). L'intérêt de ces plans réside entre autre dans leurs dimensions et leurs précisions : ils englobent pour la plupart la ville dans son contexte territorial proche (campagne, aménagements extérieurs) et peuvent permettre de compléter les ressources documentaires cadastrales.

Les plans-reliefs sont constitués de plusieurs tables qui, assemblées, montrent l'ensemble de la ville. Les matériaux employés sont majoritairement le bois, le papier pour les façades des bâtiments et les différentes textures, ainsi que de nombreux artifices exprimant la végétation (fil tordu et soie). Ces matériaux résistent peu aux aléas du temps et nécessitent des conditions de conservations particulières.

### 1.3 Le Plan relief de Toul

Le plan relief de Toul (voir figure 1) fut réalisé entre 1846 et 1861, après 200 ans de projets de réaménagement des fortifications (projet initié en 1676 par l'ingénieur Sébastien le Prestre, Marquis de Vauban). Quelques décennies plus tard commencera en France le démantèlement progressif de tous ces travaux, dont l'intérêt militaire sera devenu obsolète.

Une visite au musée des plans-reliefs à permis au laboratoire d'acquérir en 2010 de nombreuses données concernant la fabrication, l'état de conservation, et la morphologie de certaines pièces de ce musée (Scan 3D du plan reliefs de Toul). Après cette étape d'acquisition, le travail du laboratoire s'est orienté vers la recherche de moyen de modélisation « automatisée » paramétrique et applicable à l'ensemble des plans-reliefs. Plusieurs méthodes ont déjà été mises au point concernant notamment l'intérieur de la place forte, par relevé laser et photogrammétrie.

Suite à cela, le laboratoire se penche sur l'étude des murs d'enceinte de ces villes fortifiées et des aménagements militaires extérieurs.

D'autres documents permettent de préciser certaines choses sur la maquette. Une étude concernant le développement de Toul a été mis en place en dans la deuxième moitié du 20eme siècle suite à un projet de restauration et d'aménagement des remparts de Toul. Ces documents décrivent l'ensemble des modifications apportées aux fortifications de Toul de 1700 à 1948. Ils permettent de connaître la date de construction de chaque élément de façon très précise ainsi que les modifications qu'ils ont subi. Ces cahiers regroupent aussi un ensemble de cartes illustrant le développement de la ville et de la campagne avoisinante, indispensable pour visualiser l'évolution et la morphologie des éléments des dehors. Ils contiennent en plus des extraits de correspondance d'époque entre les différents acteurs du projet de fortification de Toul. Parmi ces acteurs figurent le nom du Marquis de Vauban ainsi que celui de Michel Le Peletier de Souzy, directeur général des fortifications de Louis XIV.

*[...] déterminé M. de Vauban à faire deux différents projet de fortification pour Toul, l'un assujettissant autant qu'il se peut à la vieille enceinte et à son ancienne fortification ; l'autre sans s'y assujettir et par rapport aux avantages que l'on peut tirer de sa situation.[...]*

*Rapport d'inspection dressé par Le Peletier, 10/08/1699*

Un autre document utilisé dans ce travail de restitution est une carte d'époque ayant servi de relevé à la fabrication du plan relief. Cette carte conservée au musée des plans reliefs à Paris est issue des « cahiers de développement de Toul ». De nombreuses indications de niveau y figurent, ainsi que des détails très poussés sur les ouvrages des dehors.



Figure 1 : Table de ville du plan-relief de Toul (2.31m \* 2.23m) lors de la phase d'acquisition par Scan 3D au musée des plans reliefs.

Proposition de Vauban pour un projet de fortification à Toul :

*Premier Projet :*

*[...] S'en tenir à la vieille enceinte en démolissant et rétablissant les parties qui surplombent [...].*

*[...] Le second moyen serait de la bastionner (l'enceinte), tout autour très simplement avec des bastions de médiocre étendue et de longues lignes de défense observant :*

*-de régler les faces des plus gros bastions à 45 ou 46 toises ;*

*-d'y faire des cavaliers et traverses dans les lieux où ils conviendront ;*

*[...]*

*-Il est sûr que ce système est en tout préférable à l'autre pour la force, l'ordre et la règle.*

*On y pourra ainsi faire une augmentation très considérable dans cette ville (qui) a grand besoin du côté de la rivière en s'approchant de ses bord dans laquelle il sera très aisé de faire passer un canal de la Moselle qui serait très utile à la ville. [...]*

*Mémoire sur l'ancienne ville de Toul, Vauban ; Toul, 7/09/1698*

## 2. PROBLEMATIQUE

Le laboratoire a effectué le relevé laser du plan-relief de Toul en 2010. La difficulté de traiter ces données et les besoins matériels qu'un tel travail demande nous ont confortés dans l'idée d'établir un modèle paramétrique des fortifications.

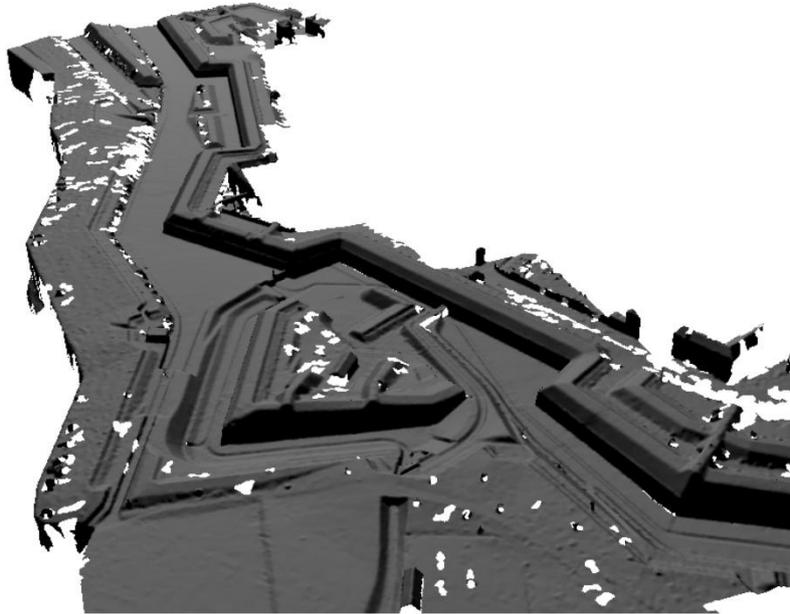


Figure 2 : Extrait du Scan 3D

### 2.1 Enjeux

Les enjeux de ce travail sont l'analyse et l'expérimentation quant à la modélisation paramétrique des « dehors » des fortifications de la ville de Toul. Il s'agit donc des éléments de fortifications les plus extérieurs de la ville, limite plus ou moins nette entre la ville et la campagne avoisinante (du pied du rempart à la fin du glacis). Bien que réalisée à l'échelle 1/600, la maquette offre de nombreux détails et est d'une grande précision. Elle offre à voir de nombreux ouvrages de terre (talus, plantations, pente de terrain) aujourd'hui enfoui sous la ville nouvelle.

Si nous sommes quasiment certains que Vauban a posé les premières bases du projet de fortifications de la ville de Toul, cet ingénieur aurait durant sa carrière participé ou dirigé plus de 300 chantiers. Son travail concerne donc de nombreuses villes frontalières du royaume de France sous Louis XIV. L'étude de textes concernant sa manière de concevoir les fortifications permet de trouver des similitudes entre de nombreuses villes géographiquement éloignées.

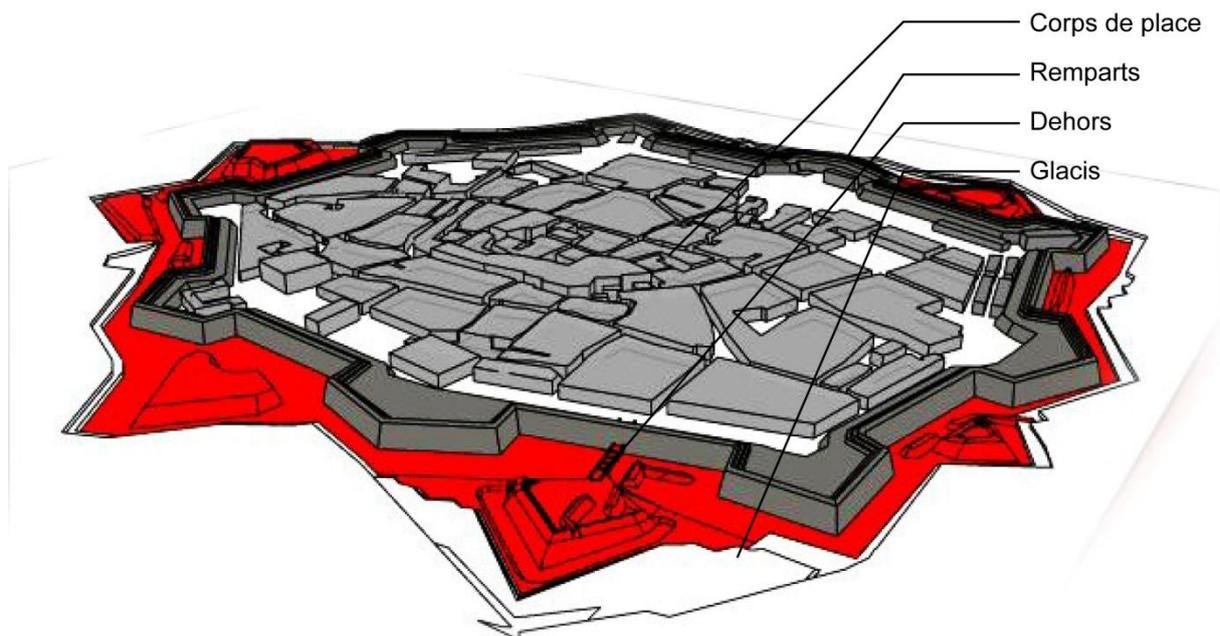
-La modélisation s'effectue par l'analyse du plan relief mais aussi par l'analyse de plans d'époque. Ces plans complètent les données du plan relief que l'échelle de la maquette ne permet pas d'appréhender (Banquettes, talus de faible importance, différences de niveaux minimales entre plusieurs éléments).

-l'analyse des méthodes de constructions de Vauban permettra de généraliser le travail à de nombreuses villes fortifiées.

## 2.2 Travail effectué

Lors de ce stage, nous avons entamé le travail de modélisation paramétrique des dehors de la ville de Toul. Il nous a donc fallu mettre au point une méthode générale (voir chapitre 4. Principe de la méthode). Nous avons donc cherché et étudié les différents documents nécessaires et émis des possibilités de lignes conductrices pour ce travail. Le travail devait à la base se porter sur un élément particulier des dehors : la demi-lune. Nous avons cependant continué le travail et nous l'avons élargi au maximum. Il englobe aujourd'hui la quasi-totalité des ouvrages des dehors de la ville de Toul : demi-lune, contre garde, tenaille, talus et traverses, chemin couvert et glacis (voir chapitre 5.analyse et modélisation).

Ce travail s'est effectué en parallèle du travail de Kevin Jacquot concernant la modélisation paramétrique du corps de place (enceinte principale d'une ville fortifiée) et le travail d'Asma Kriouch concernant les bâtiments à l'intérieur de l'enceinte (voir figure 3). Il a donc fallu trouver le lien existant entre le corps de place et les dehors des fortifications, puis assembler les travaux afin d'obtenir une esquisse d'un modèle paramétrique complet des fortifications.



*Figure 3 : Maquette 3D des fortifications de Toul effectuée avec Maya. Ce modèle non paramétrique a servi de « test » pour les volumes paramétrés ensuite avec Grasshopper. En rouge figurent les zones étudiées lors de ce stage. Elles englobent l'essentiel du pourtour de la ville. Toul représente un excellent modèle à étudier car il regroupe un ensemble assez varié d'éléments des dehors. De plus, la géométrie de la ville est relativement régulière et la topographie peu prononcée, ce qui limite considérablement les différences entre la théorie et la construction réelle.*

## 3. Approches Existantes

### 3.1 Modélisation de plan-relief

2 expériences particulières ont été menées pour modéliser un plan-relief. Il s'agit des villes de Rome et de Prague.

#### 3.1.1 Le plan relief de Prague

Le plan relief de Prague d'Antonin Langweil fut construit entre 1826 et 1837. Il est d'une dimension moindre que celui de Toul (20m<sup>2</sup>) et fabriqué à une échelle plus importante (1/480). La maquette a été longtemps utilisée par les employés de l'office du patrimoine de la mairie de Prague lors de projet de restauration du patrimoine. Une maquette numérique est dans ces circonstances le meilleur moyen de circuler dans la ville du 19<sup>ème</sup> siècle, d'y observer les façades des bâtiments, et de préserver le plan relief original de nombreuses manipulations.

Les techniques employées pour sa restitution sont le traitement de nuage de point issu de relevés photogrammétriques ainsi que le relevé photogramétrique manuel de certains éléments particuliers (bâtiments notamment). Près de 300 000 prises de vue ont été nécessaires afin de construire ce modèle numérique en trois dimensions. Chaque élément a été capté à partir d'angles différents. Des systèmes automatisés de robots ont été employés afin de faciliter la tâche. Près de 200 personnes y ont travaillé pendant 2 ans, de 2008 à 2009.



*Figure 4 : Acquisition manuelle de points caractéristiques sur un bâtiment du plan relief de Prague. Les techniques de photogrammétrie nécessitent l'utilisation de logiciels spécifiques, Autodesk ImageModeler dans le cas de Prague, ainsi que des facilités d'accès aux différentes tables constituant le plan relief. La mise en œuvre de ces techniques est donc complexe et nécessite la présence de nombreuses personnes ainsi qu'une durée de travail très importante.*

### 3.1.2 Le plan relief de Rome

Le projet ROME REBORN fut lancé en 1997 afin d'illustrer le développement de Rome de 1000 av J.C à 500 ap J.C. Ce projet passe par la modélisation de la ville de façon la plus fidèle possible à une date donnée. Plusieurs techniques ont été employées à cette phase du travail.

Les bâtiments ont été triés selon différentes classes d'importance, et la maquette a été numérisée à l'aide de capteurs tridimensionnels. Le maillage ainsi obtenu fut retravaillé afin d'être en partie réutilisé dans la maquette numérique finale pour les bâtiments dit de classe II. Ces bâtiments représentent 95 % de la ville et ont pu être recréés grâce à CityEngine, un outil de modélisation procédurale. Les données issues de la numérisation de la maquette seront traitées de façon à classer les différentes typologies de construction en fonction de leurs volumétries globales. Des volumes paramétrable en fonction de chaque typologie sont modélisés et associés au maillage issu de la numérisation. Il a donc été possible de restituer un environnement réaliste à l'aide de quelques typologies de constructions seulement, en appliquant de légères variations de paramètres afin de s'accorder le plus fidèlement possible au plan relief. Bien que ce travail ait abouti à une restitution réaliste de Rome, beaucoup d'inexactitudes ont été engendrées par l'utilisation de la modélisation procédurale.

D'autres éléments d'architecture de classe I comme le Circus Maximus ou le temple Vespalien ont été entièrement restitués à l'aide de modeleur comme 3Dsmax. La restitution de ces bâtiments fut facilitée par le nombre de sources historiques les décrivant.



Figure 5 :A gauche :image issue de la modélisation par méthode classique du temple vespalien. A droite : le maillage corrigé issu de la numérisation laser et différents types de volumes utilisés sur CityEngine.(5)

### 3.2 Modélisation paramétrique

Les moteurs de modélisation paramétrique s'appuient sur des paramètres (des chiffres ou des caractéristiques) afin de déterminer le comportement d'une entité graphique et définir les relations entre les composants du modèle (parallélisme/orthogonalité entre deux droites, distance entre deux points...). La modification du modèle est d'autant plus facile qu'elle préserve les « règles » originales de l'élément modélisé. Au fur et à mesure que l'utilisateur modifie les éléments, le moteur de modification paramétrique identifie les autres composants qui doivent être « mis à jour ».

Les applications liées à l'architecture sont nombreuses : simulation thermique, lumière, ou même modélisation d'un objet architectural complet.

Des tests ont été effectués concernant les ordres classiques en architecture. En effet, l'architecture classique obéit à de nombreuses règles de proportion, de forme.

Exemple des ordres en architecture : règles théoriques des traités d'architecture appliqués à la modélisation paramétrique de colonnes.

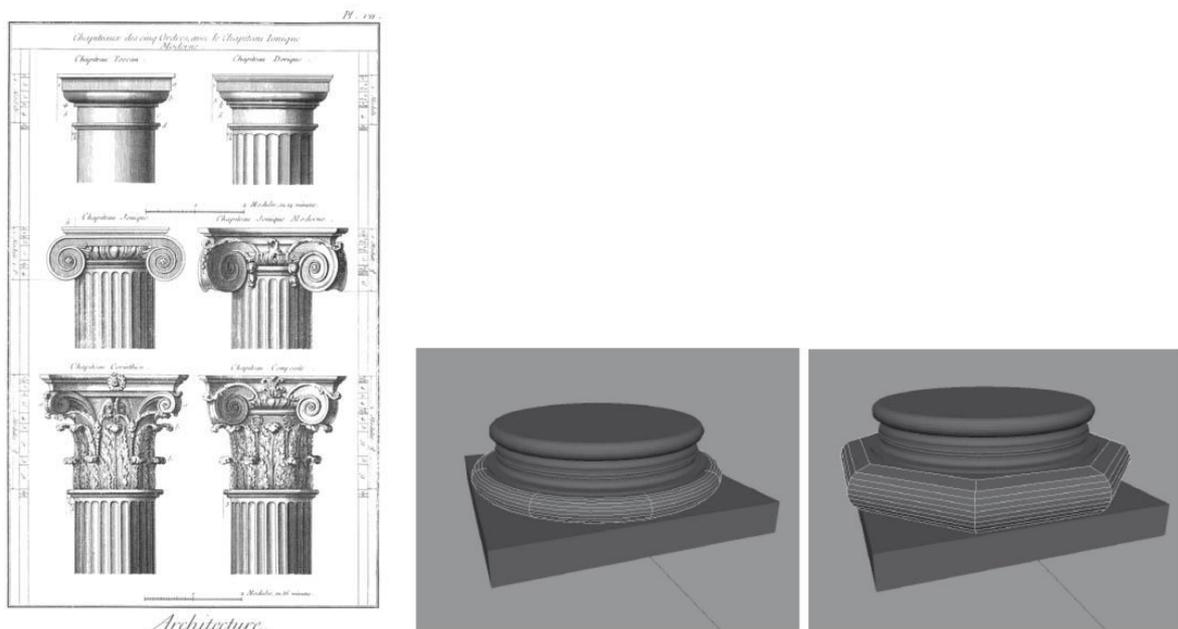


Figure 6 : Etude des ordres classiques : analyse des paramètres, application des variations de ces paramètres. (6)

L'intérêt de l'utilisation de modèles paramétriques et donc de formalisation de forme bâtie réside en le fait de créer une bibliothèque d'objets normalisés utiles à un corps de métier en particulier. Parmi les modeleurs paramétriques nous pourrions citer GOP utilisé par le CRAI ou encore Houdini ou Grasshopper, plugin de rhinocéros 3D. L'utilisateur choisira un objet dans une bibliothèque. Il est créé en temps réel par le modeleur et comporte une série de paramètres ajustables réglés en premier lieu par défaut. L'objet pourra ensuite être modifié par l'utilisateur qui agira sur ces paramètres et pourra visualiser le résultat en temps réel.

### 3.3 Modélisation de fortifications

D'autres travaux de modélisation de ville fortifiée ont été amorcés notamment à des fins d'information liées au tourisme. Parmi ceux-ci nous pouvons relever le travail effectué sur Brest et Carcassonne.

#### -Maquette 3D de Brest

Un plan relief (16,45 x 7,93 m ECH 1/600) daté de 1807 existe au musée des Invalides de Paris. Le modèle 3D représente l'ensemble de la ville avec son port et ses murs d'enceinte à une échelle très précise (représentation des créneaux, bites d'amarrages...). Ce modèle même s'il s'appuie sur une étude détaillée de la ville n'est pas une représentation du plan relief mais une représentation de la ville telle que construite à une époque donnée.

*Figure 7 : Il s'agit d'une modélisation standard, un important travail de texture a été effectué afin de rendre afin de rendre les images le plus réaliste possible. Les matériaux du plan-relief n'ont donc pas été pris en compte. Cette méthode à l'avantage de pouvoir s'appuyer sur une variété importante de documents et permet en quelques sortes de choisir l'image que l'on veut faire ressortir de cette maquette numérique. (<http://brest3d.free.fr>)*



#### -Maquette 3D de Carcassonne et des fortifications médiévales

La méthode utilisée pour la modélisation de Carcassonne est similaire à celle employé par le laboratoire en 2010, mais s'appuie sur des moyens beaucoup plus lourds. La modélisation est effectuée par la combinaison de données lidar (« **Light Detection and Ranging** ») et photos aériennes à l'aide d'appareil embarqué lors d'un survol de la ville.



*Figure 8 : La technologie Lidar permet d'obtenir un maillage du terrain, chaque point étant repéré par ses coordonnées GPS. Associé à un système d'acquisition photo et de logiciel d'orthorectification, cette méthode permet la restitution photo réaliste d'objets architecturaux complexes sur des zones très étendues. (<http://www.riesonweb.com>)*

## 4. principe de la méthode

La méthode retenue pour la modélisation paramétrique des fortifications de Toul peut se décomposer en 4 phases.

### 4.1 Récoltes de données :

Dans un premier temps cette phase consiste à analyser les traités d'architecture militaire de l'époque. Plusieurs noms d'ingénieurs militaires ont été retenus comme étant les plus pertinents à étudier. Les critères de sélection des ingénieurs correspondent à leur notoriété et donc leurs influences sur la pensée de l'époque. Ils seront retenus en tant que praticien et non théoricien.

Dans un second temps, les informations relatives à la ville traitée seront récoltées (Toul dans notre cas). L'approche historique permettra de savoir lequel des ingénieurs précédemment étudié est susceptible d'avoir engagé les travaux de fortifications. Cette phase s'appuiera donc sur tous les types de documents possibles, au delà du seul plan-relief. Ainsi, dans le cas de Toul, nous avons pu étudier un historique complet des fortifications, des plans historiques (peu précis), mais aussi un plan de la ville de la même époque que le plan relief. Ce plan contient des informations très précises concernant notamment les niveaux de terrains. Nous pouvons voir tout le travail effectué sur les différents talus et banquettes, détails invisibles sur la maquette.

### 4.2 Modélisation théorique

Cette phase du travail consiste à modéliser en trois dimensions les éléments de fortifications en s'appuyant uniquement sur la théorie. Elle permet dans un premier temps de comprendre le système général du tracé des dehors et d'avoir un aperçu de ce que seraient les fortifications « idéales ». Dans ce travail, seules les idées de Vauban seront étudiées.

Les ouvrages théoriques traitant de la manière de fortifier du Marquis de Vauban sont nombreux et beaucoup d'entre eux d'une exactitude douteuse. En amont de ce travail, une recherche a été menée afin de déterminer lesquels de ces ouvrages semblaient les plus à même de répondre à nos interrogations concernant le tracé des fortifications.

*« C'est d'ailleurs ce dédain pour les principes préétablis qui explique le refus de Vauban d'écrire un traité de fortification pour répondre à son « traité de l'attaque des places »*

*Nicolas Faucherre, Places fortes bastion du pouvoir*

Un ensemble de modèles paramétriques sera ainsi mis en place à l'aide des logiciels Grasshopper et Rhinocéros (voir illustration chapitre 4.4)

### 4.3 Test sur le réel

Lors de cette phase, les éléments précédemment modélisés seront confrontés à la réalité de la construction. Ils seront « calqués » sur l'image en plan de la ville. Afin de permettre une meilleure vision de ces systèmes théoriques en 3D, le modèle théorique paramétrique sera confronté à un modèle 3D standard (effectué sur Maya).

Dans un second temps le modèle 3D paramétrique issu de Grasshopper pourrait être calqué sur le nuage de points issu du scan. Ainsi les volumes modélisés seront confrontés directement au plan relief et non aux relevés ayant servi à sa fabrication. Cette phase n'a cependant pas été approfondie durant ce stage.

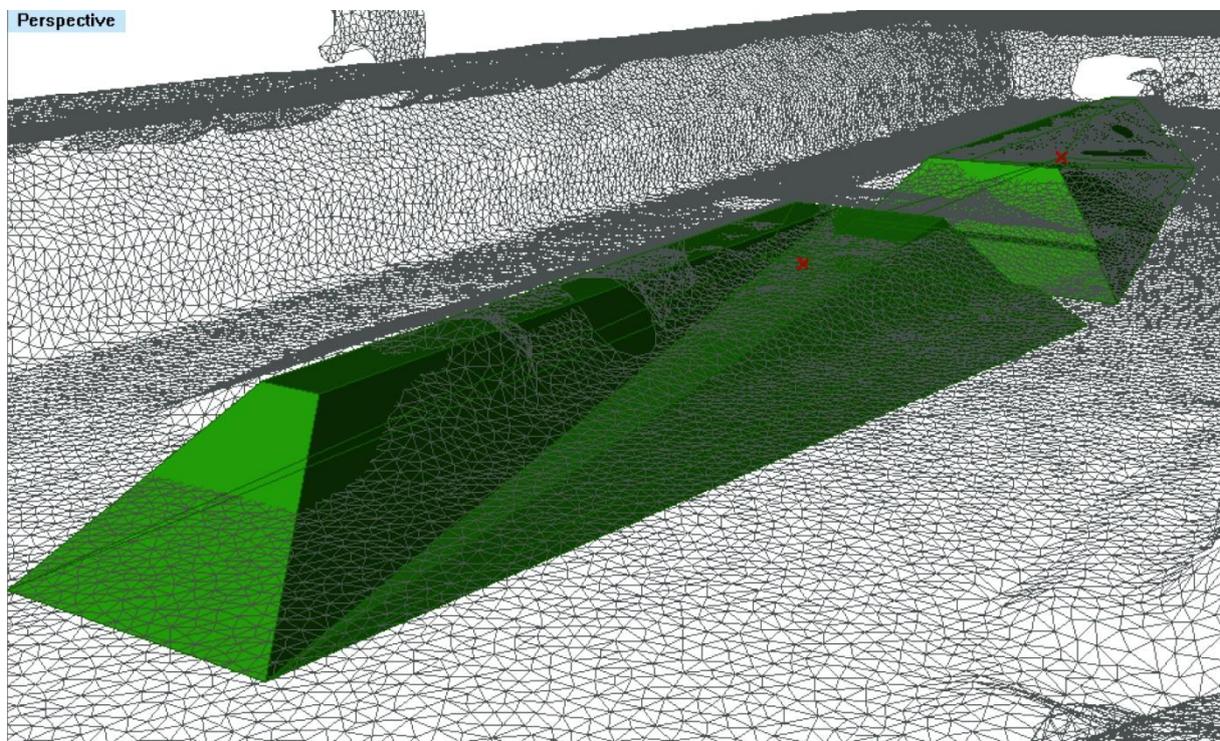


Figure 9 : Superposition de la maquette 3D de la tenaille de Toul effectuée sur Grasshopper et de la surface issue du scan du plan-relief.

La difficulté de confronter la surface scannée et le modèle 3D réside en la lourdeur des manipulations à effectuer. Même si cela permet de se faire une idée sur la justesse ou non des différents modèles paramétrés (en coupe notamment), les arrêtes vives, les arbres sont autant d'éléments qui rendent flou le maillage scannée et rendent difficile la comparaison entre l'élément modélisé et l'élément existant.

#### 4.4 Modification de la théorie et adaptation sur le réel

L'implémentation du modèle théorique a permis de mettre en évidence certains paramètres récurrents sur les différents éléments, ainsi que les imperfections du modèle théorique lors ce que celui-ci est confronté au réel. Dans cette phase, une série d'ajustement des paramètres de base sera effectué afin d'adapter au mieux le modèle théorique. Nous verrons plus tard que lors de cette phase, certains éléments des dehors à la géométrie particulière seront entièrement paramétrés sans passer par la phase théorique (voir chapitre 5.1.1 les tenailles).

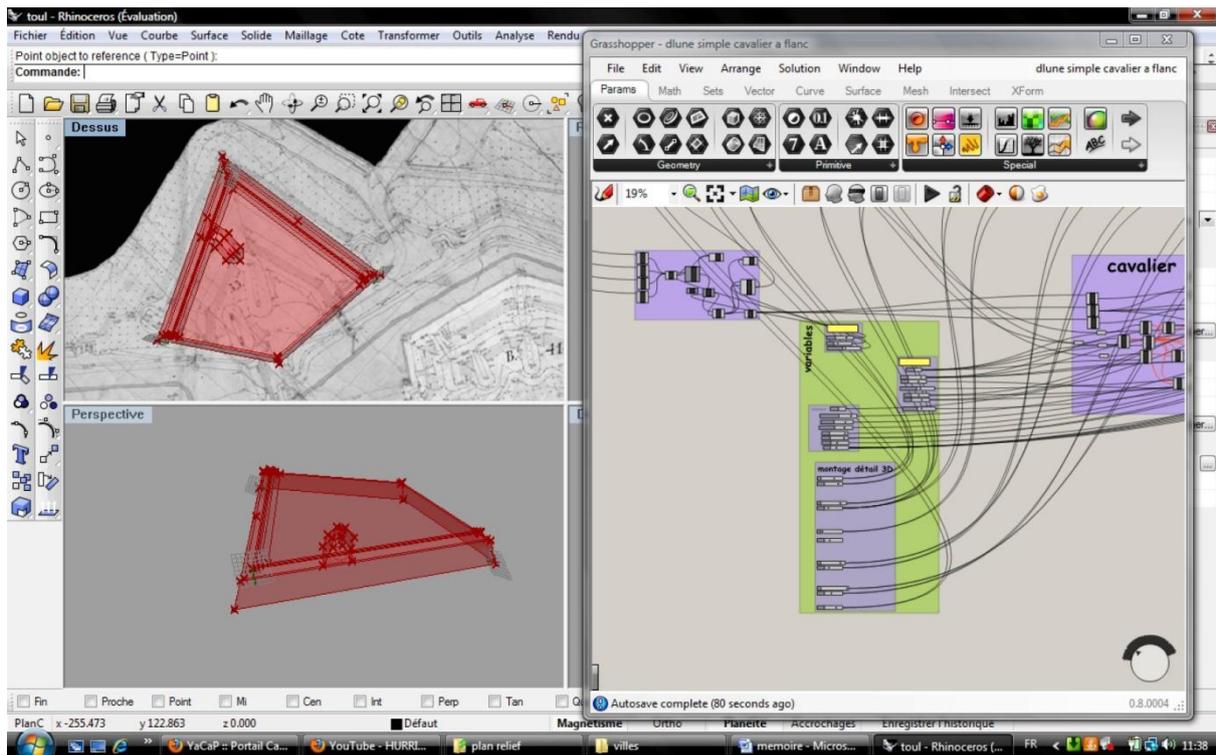


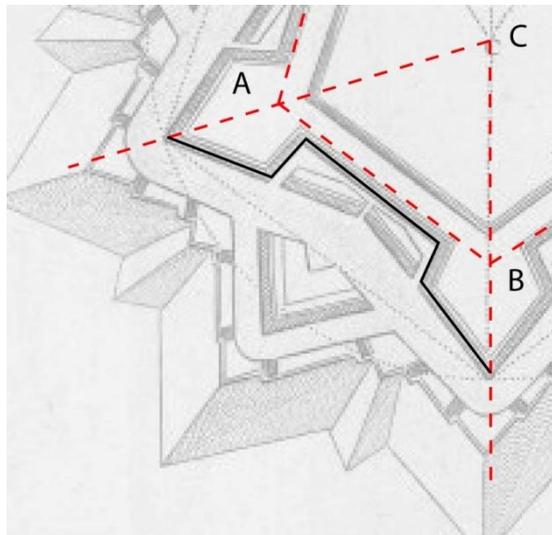
Figure 10 : Interface de Grasshopper : paramétrage des éléments (à droite) et visualisation 3D en temps réel (à gauche). L'utilisateur agit directement sur les paramètres de la forme géométrique modélisée. Ces paramètres se trouvent dans notre cas sous forme de valeurs numériques ou booléennes représentant le choix d'une forme, une dimension en mètres, ou la valeur d'un angle.

Lors de cette dernière phase de travail, les éléments modélisés pour Toul seront confrontés à d'autres villes de la région : Metz, Marsal et Verdun, fortifiées à la même époque que Toul. Ceci nous permettra de voir si le modèle paramétrique effectué pour Toul peut s'adapter à d'autres villes, et ainsi valider la méthode de travail employée. Les détails historiques de ces villes n'ont pas été analysés, principalement pour des raisons de temps. Il n'en reste pas moins qu'au fur et à mesure des tests effectués, certaines parties des fortifications de ces villes correspondent parfaitement au modèle paramétrique de Toul.

## 5. ANALYSE ET MODELISATION

L'analyse présentée ci après suit le cheminement des méthodes de construction du Marquis de Vauban rapportée par M. Le Blond, Maître de mathématique des enfants de France.

Le projet, le tracé sur papier dans un premier temps, puis la construction, s'opèrent de la façon suivante : une fois le tracé de la place forte effectué, il sera décidé quels éléments des dehors seront présents sur chaque front. Un front étant marqué par deux bastions et la courtine qui les relie. Dans le cadre de la modélisation d'une ville ayant réellement existée et non d'une modélisation de fortifications idéales (polygone régulier), les lignes du front déterminent les lignes de construction des éléments des dehors.

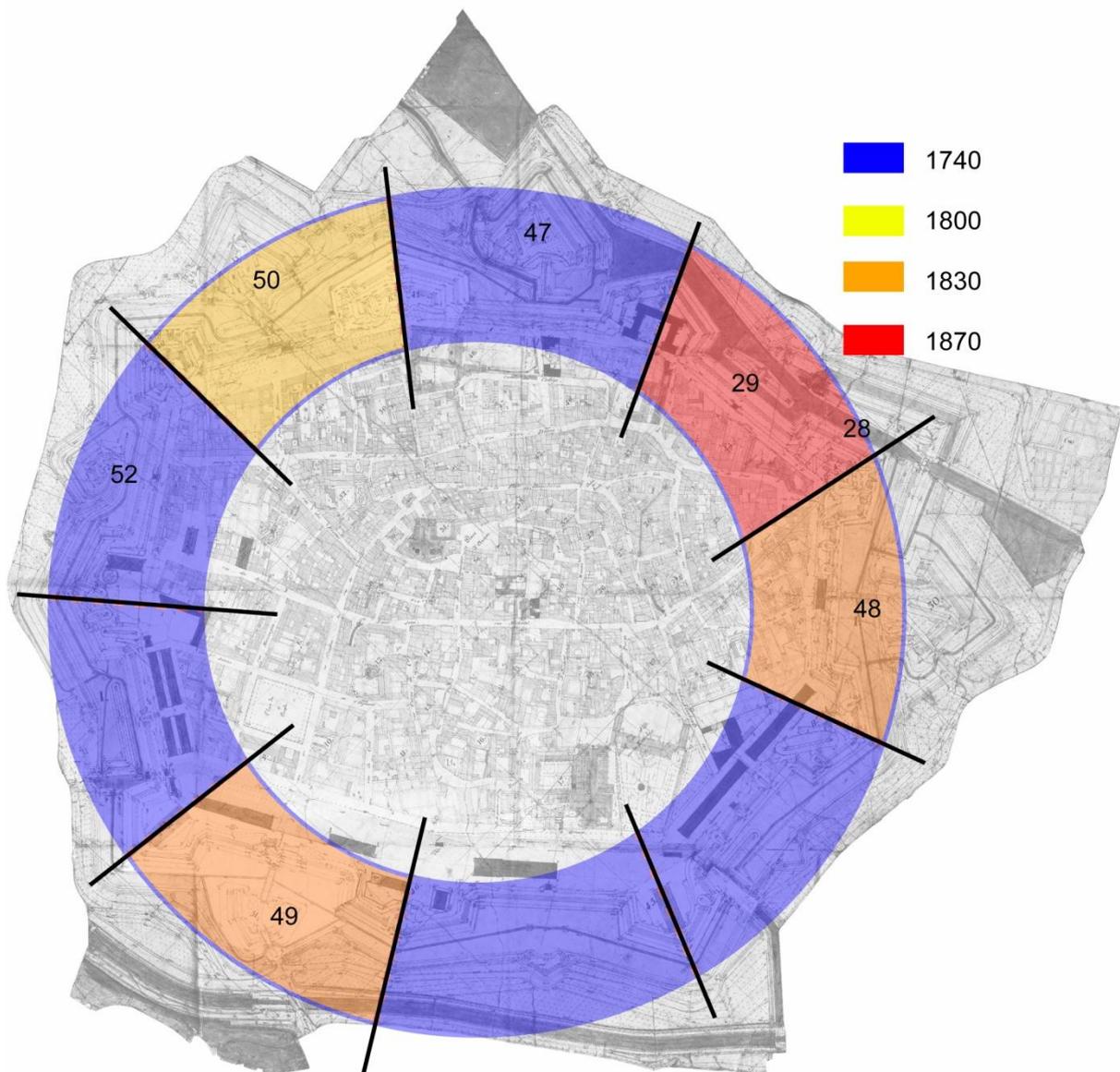


*Figure 11 : Les bastions A et B génèrent les lignes conductrices de tout élément des dehors contenus dans l'angle ACB. Ainsi l'ensemble des fortifications peut être appréhendé en une adjonction de fronts bastionnés. ( Eléments de fortification)*

Une fois seulement les éléments placés, le chemin couvert sera tracé, englobant l'ensemble de la place forte. Cette méthode nous permet dans un premier temps de faciliter l'analyse en nous concentrant sur des points spécifiques des fortifications de Toul. Par la suite, les différents fronts seront modélisés un à un et assemblés pour obtenir l'ensemble des dehors de la ville. Le modèle théorique de Vauban voudrait que chaque front bastionné soit défendu de manière similaire, c'est-à-dire comporter les mêmes éléments des dehors mais aussi les mêmes dimensions (fortification idéale). La réalité du terrain et la réalité économique d'un tel chantier fait que chaque front comporte ses spécificités (voir chapitre 5.4 Modélisation globale suivant la méthode front par front)

### Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

Cette méthode est d'autant plus proche de la réalité que certains fronts bastionnés au sein d'une même ville pourront être conçus par différents ingénieurs. Le schéma ci-dessus représente les neuf fronts bastionnés de la ville de Toul ainsi que les dates de construction de ceux-ci (les éléments pourront cependant évoluer dans le temps). Les travaux seront dirigés par un subordonné de Vauban, l'ingénieur Tardif. Dans les années 1874-1885, Le général Séré de Rivière, directeur du Génie, aurait lui aussi participé à des travaux de rénovation des fortifications de Toul. Il suffira alors de choisir quelle méthode de construction appliquer pour chaque front en fonctions des données historiques recueillies (voir figure12).



*Figure 12 : Schéma daté des différents fronts bastionnés de la ville de Toul. Les travaux commencèrent au alentour de 1700 sur les plans de Vauban. Les fortifications de la ville ont subi de nombreuses modifications en 200 ans d'histoire. Les numéros correspondent à la nomenclature utilisée dans les chapitres suivants.*

## 5.1 Les ouvrages maçonnés

### 5.1.1 Les tenailles (annexes p42)

Même s'il existe plusieurs types de tenailles répertoriées par Le Blond, la tenaille de Toul (front bastionné 29), qui subsiste aujourd'hui ne répond à aucune méthode de construction. Projetée en 1832 et apparaissant pour la première fois sur les plans de 1870, bien après la mort de Vauban, cette tenaille obéit à de nouvelles règles de construction.

Afin de traiter son positionnement au sein du système de fortification et d'émettre des hypothèses quant à sa construction nous verrons tout d'abord les méthodes de constructions relatives dans le traité de G. Le Blond :

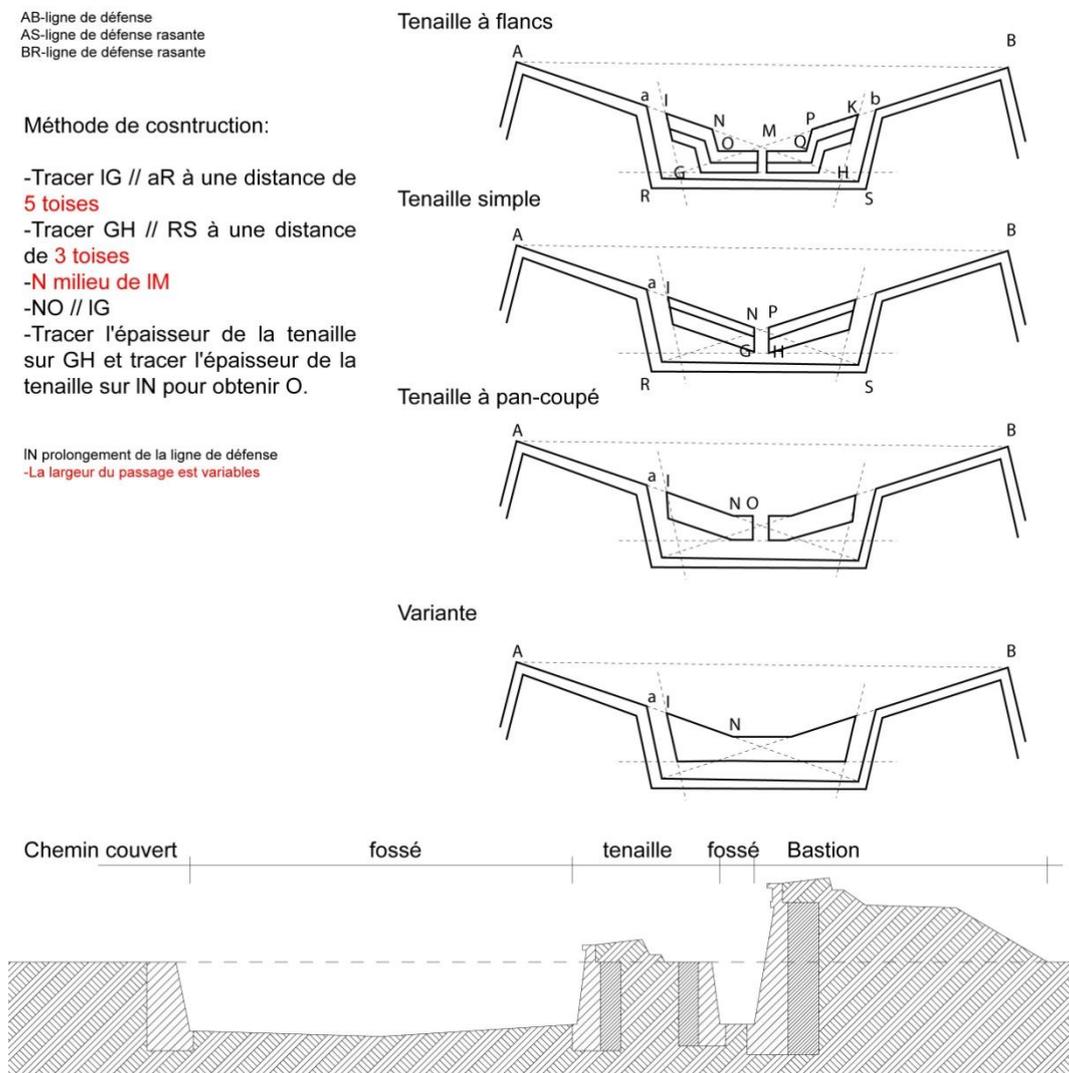


Figure 13 : En plus de la géométrie en elle-même de la tenaille, vient s'ajouter comme paramètre la présence ou non d'un passage joignant la courtine au fossé (présence d'une poterne sur la courtine).

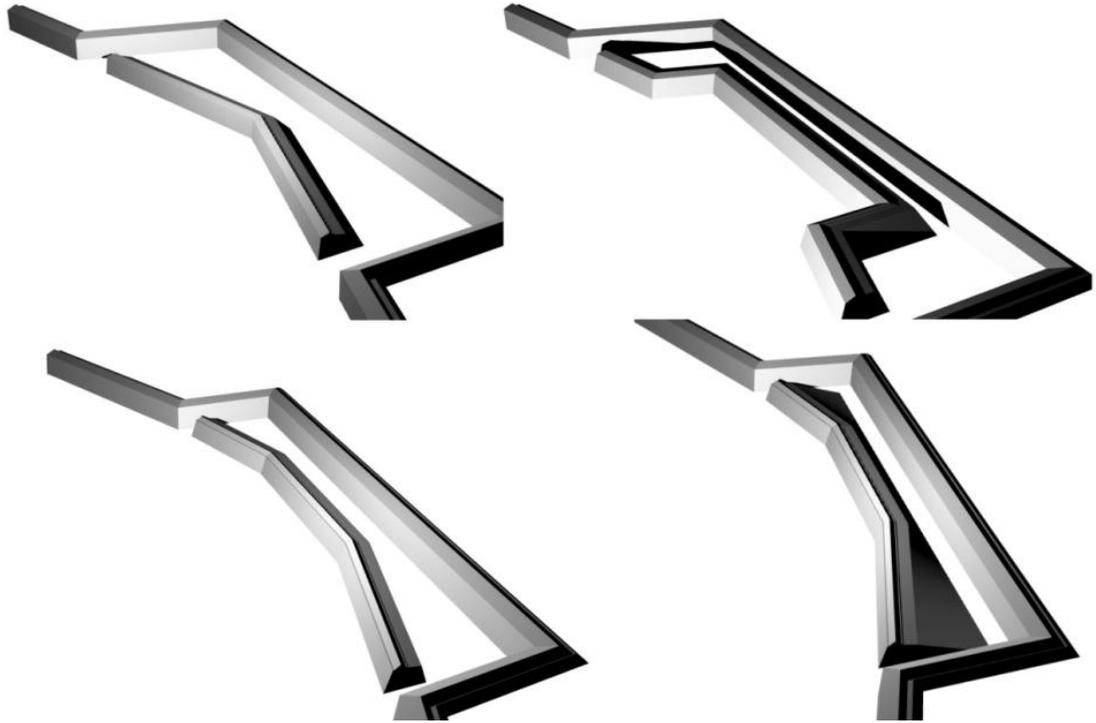


Figure 14 : modèles 3D de différentes tenailles issues de Grasshopper.

La tenaille simple par exemple est le seul modèle utilisé dans les fortifications de Metz. Elle est utilisée à 7 exemplaires notamment pour renforcer des ouvrages avancés comme le fort de Belle Croix ou encore la garnison de la porte de Thionville / Porte de France. Les fortifications de Verdun et de Marsal ne comprennent pas de tenailles.

Les quatre villes étudiées sont des places fortes appelées « place arrière » du pré carré de Vauban. Dans le cas de Toul, nous savons qu'une part importante du projet de fortification fut abandonnée au 18<sup>ème</sup> siècle car considérée comme « place forte de troisième rang ». La position de ces villes au sein d'un système plus global de défense du territoire français fait que leurs fortifications sont quelque peu « atrophiées », réduites au simple minimum. Ainsi très peu d'éléments des dehors y apparaissent à l'exception des demi-lunes et des quelques ouvrages complexes de fortification de citadelle, comme à Metz et à Verdun (ouvrage à cornes et ouvrage à couronne).

« Sérieusement, Monseigneur, le roi devrait un peu songer à faire son pré carré. Cette confusion de places amies et ennemies ne me plaît point. [...]C'est pourquoi, soit par traité ou par une bonne guerre, Monseigneur, prêchez toujours la quadrature, non pas du cercle, mais du pré. »

Lettre adressée par Vauban à Louvois, surintendant des Bâtiments, Arts et Manufactures de France, en janvier 1673

### 5.1.2 Cas particulier de la tenaille de Toul (annexes p44)

Les paramètres choisis pour le positionnement de cette tenaille sont identiques à ceux des traités d'architecture. Cette tenaille ne comprend pas de parties maçonnées à l'instar des tenailles « standards » ce qui implique des pentes de terrain plus faibles dans sa géométrie. Elle ne dispose pas de banquettes en vis-à-vis de la courtine mais au niveau du passage. Elle est décrite dans les ouvrages historiques comme étant bel et bien une tenaille mais répond plus à la fonction de « caponnière ». Ceci explique sans doute sa géométrie particulière.

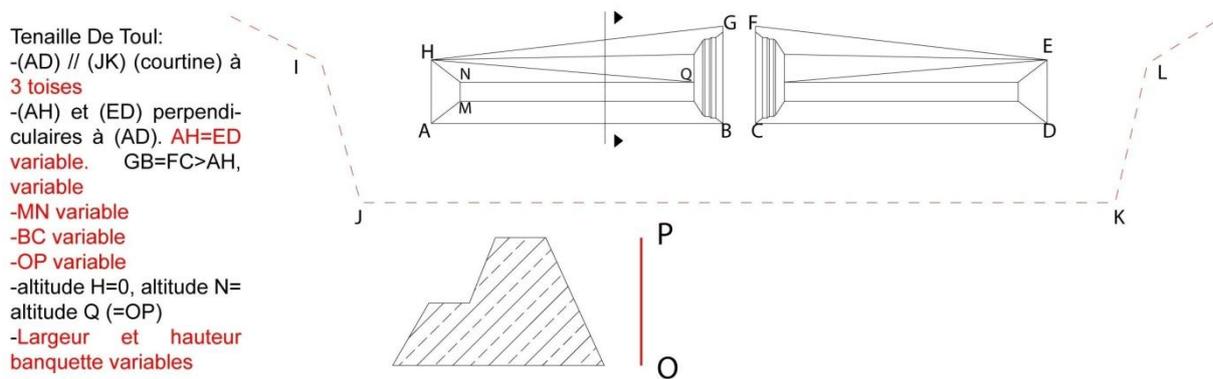


Figure 15 : plan et coupe de tenaille présente à Toul.

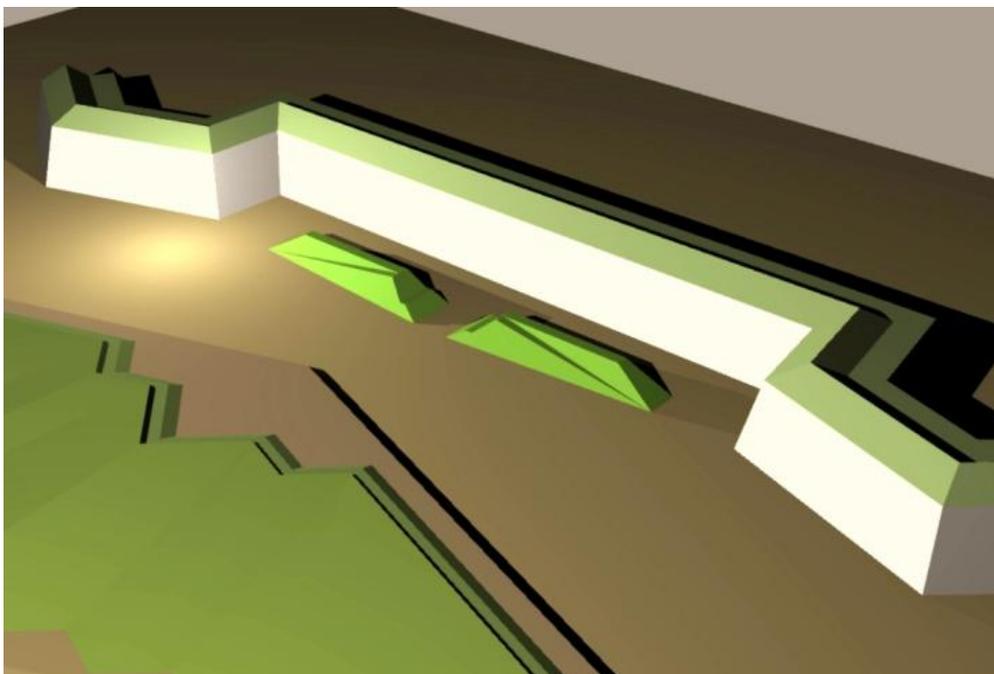


Figure 16 : Modélisation sur Grasshopper du front bastionné de Toul comprenant la tenaille ainsi que le chemin couvert, la place d'arme et le glacis.

### 5.1.2 Les Demi-lunes (annexes p45)

Les demi-lunes forment l'élément le plus important des dehors. Son positionnement s'effectue au niveau des courtines. Les fortifications de Toul révèlent 2 types de demi-lunes distinctes ainsi que les variantes inhérentes à chacune.

Le modèle le plus répandu à Toul est la demi-lune à flanc. Sa construction est explicitée dans l'ouvrage de Le Blond (voir figure 17).

Demi-lune simple:

placer O et P:  $OR = HP = 5/6$  toises

-Tracer (RN) // (HB) et (LR) // (OR) à  $15/20$  toises des faces du bastion. R se trouve à leur intersection

-M intersection du cercle de centre F et de rayon FO et de (BR)

RM-ligne capitale de la demi lune

Demi-lune à flanc:

bcd- minimum  $60^\circ$

hd=10 toises

fd=7 toises

joindre h et f et g et l

AB-ligne de défense

$120 < AB < 200$

AF-ligne de défense rasante

ch-face de la demi-lune

hf-flanc de la demi-lune

LR-gorge de la demi-lune

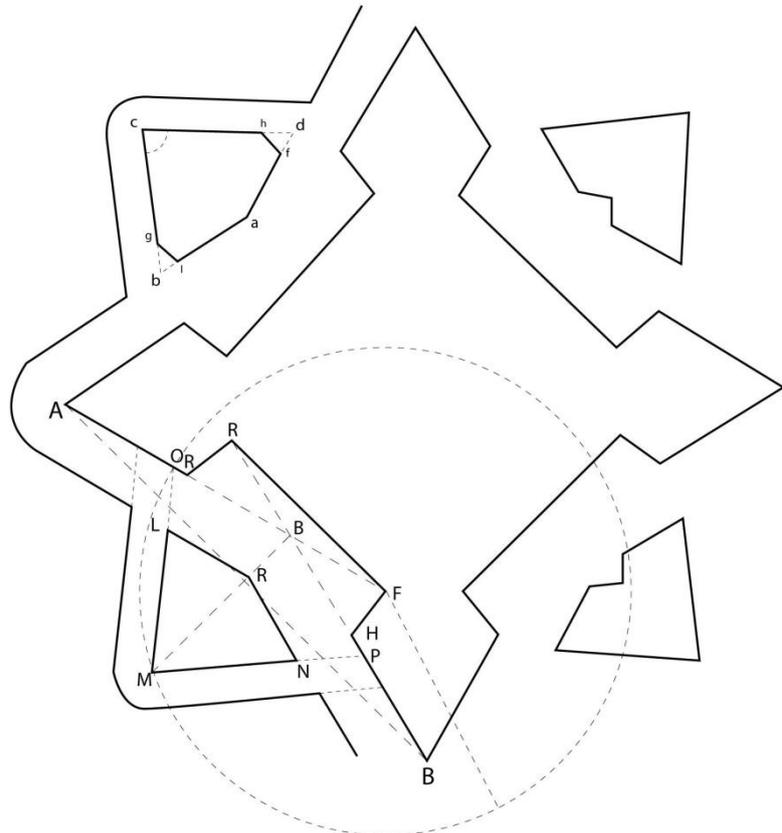


Figure 17 : Méthode de construction des demi-lunes. Nous remarquerons que la demi-lune à flanc est issue d'une simple modification de la géométrie d'une demi-lune simple.

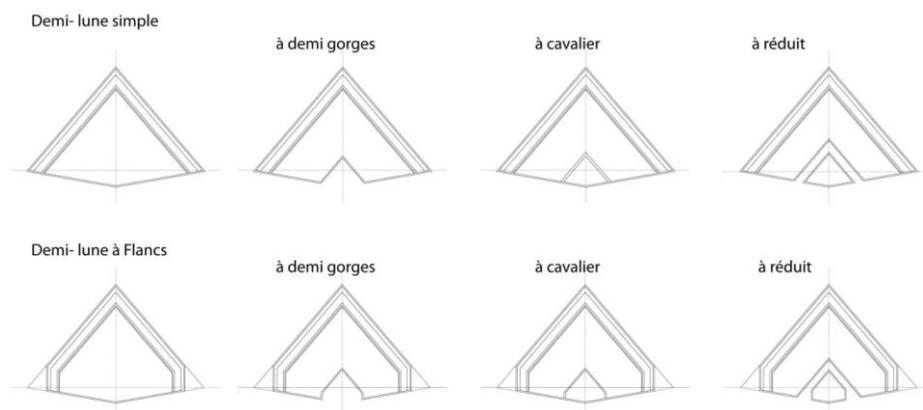
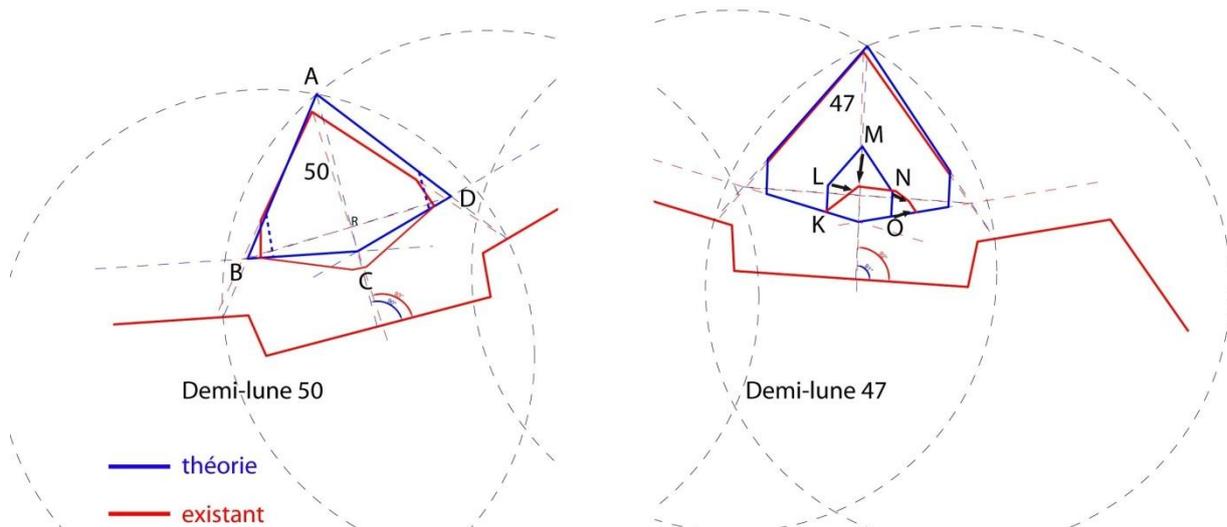


Figure 18 : Variantes exercées sur les demi-lunes de bases.

## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle



La confrontation du modèle théorique et du modèle construit met en évidence : la nécessité de traiter chaque paramètre de façon asymétrique, d'ajouter une variable : la **distance RC** sur la capitale de la demi-lune (les gorges de la demi-lune perdent leur parallélisme avec les faces des bastions), d'ajouter comme variable **l'angle formé par la capitale de la demi-lune et la courtine**.

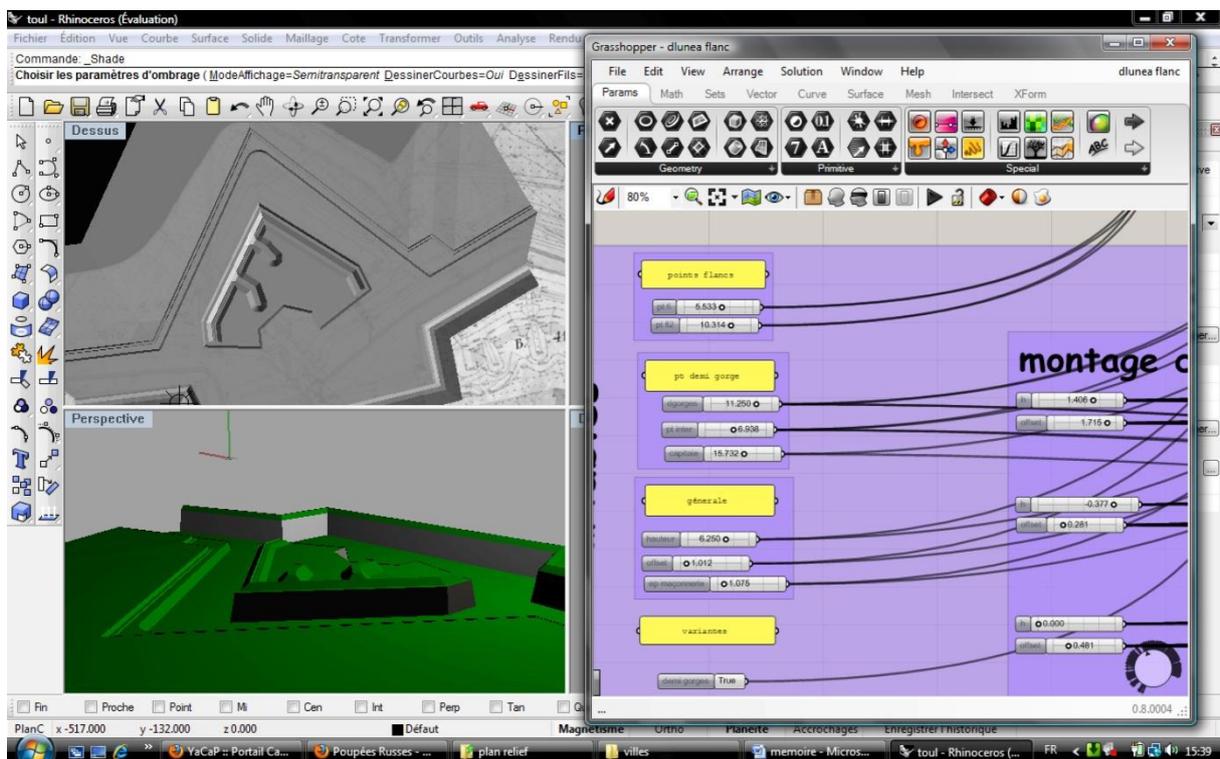


Figure 19 : Modélisation d'une demi-lune à Flanc avec demi-gorges et 2 traverses. Le modèle prend en compte le positionnement de la demi-lune, la largeur des fossés, le dimensionnement des places d'armes.

## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

Ces modifications du modèle théorique permettent dans le cas de Toul d'obtenir de façon correcte 3 des 5 demi-lunes. Appliqués aux plans des villes de Metz, Verdun et Marsal, ils peuvent répondre à toutes les géométries de demi-lune.

Les 2 autres répondent à d'autres critères :

La demi-lune 48 : demi-lune avec orillons, non explicitée dans les traités théoriques. Son tracé peut s'effectuer à partir des règles de construction des bastions à orillons.

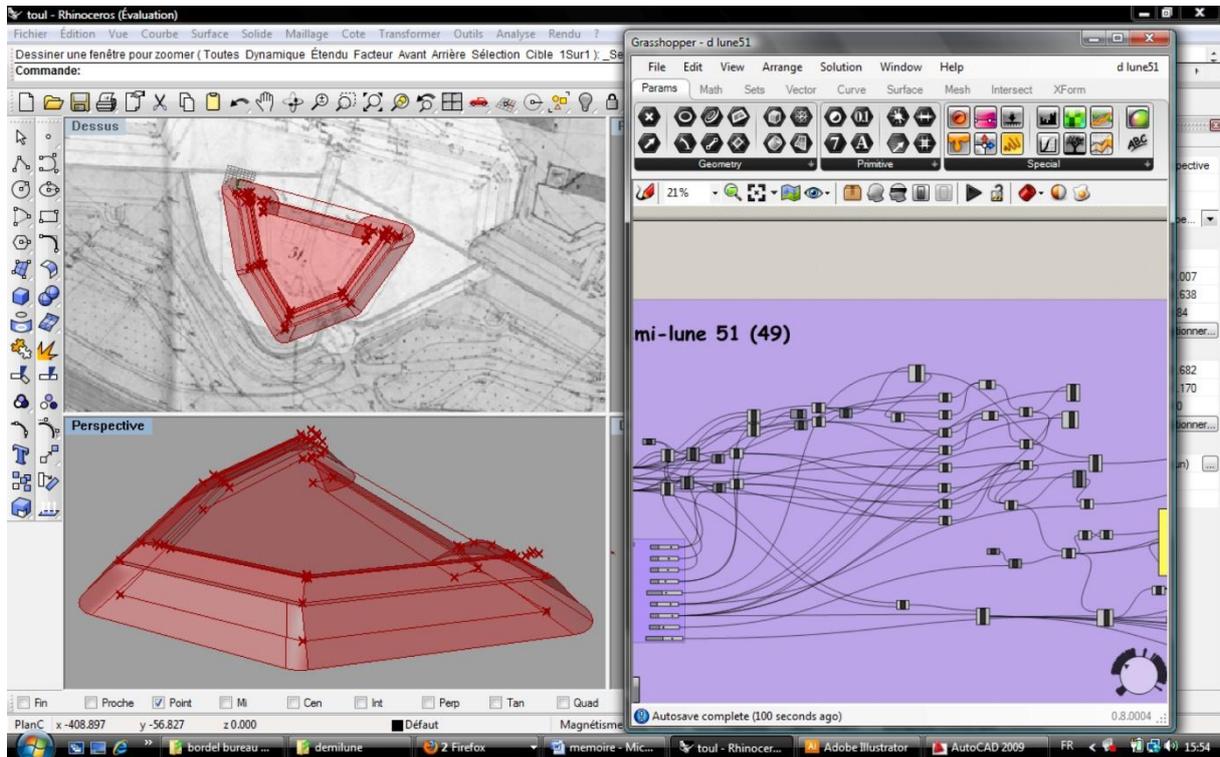


Figure 20 : Implémentation de la Demi-lune 49 de Toul. Son positionnement s'effectue par la même méthode que les autres demi-lunes.

La géométrie de la demi-lune 48 s'explique par l'interpénétration de celle-ci avec un talus (voir figure ...chapitre 5.3.1 Les contre-gardes) mais son tracé de base correspond à la théorie. Cette demi-lune n'a pas été modélisée avec Grasshopper pour des raisons de temps.

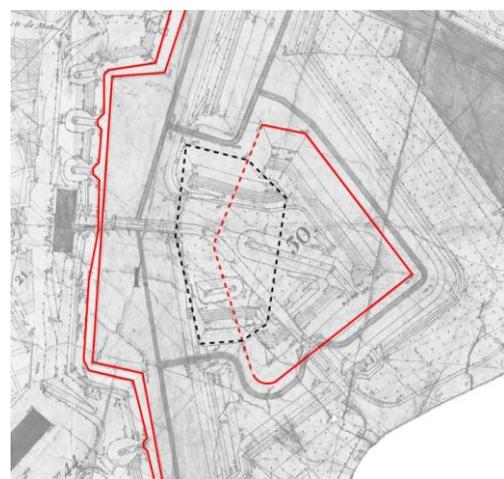


Figure 21 : Vue en plan de la demi-lune 48. En rouge figure le tracé standard de la demi-lune, en noir l'élément ajouté à la géométrie de base.

### 5.1.3 Les contre-gardes (annexes p47)

Les contre-gardes couvrent les faces des bastions. Se sont des éléments peu fréquents dans les 4 villes étudiées. Il en existe une à Toul et une à Metz seulement. A l'inverse des demi-lunes, lesquelles montrent différentes typologies au sein de la même place forte (Nous pouvons référencer à Toul 2 typologies de demi-lune), les contre-gardes semblent relativement identiques dans leurs formes et leurs proportions quelle que soit la ville où elles se trouvent.

- AD = TV = 16 toises, parallèles aux face des demi-lunes 1 et 2
- DC // AG
- C intersection de DC et CV  
sommet de l'angle saillant de la contre-garde

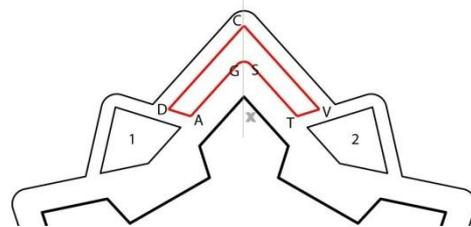


Figure 22 : Principe de construction de la contre-garde selon G. Le Blond.

Nous remarquerons que dans le cas où les demi-lunes 1 et 2 n'existent pas, les angles GAD et STV deviennent variables (cas de Toul)

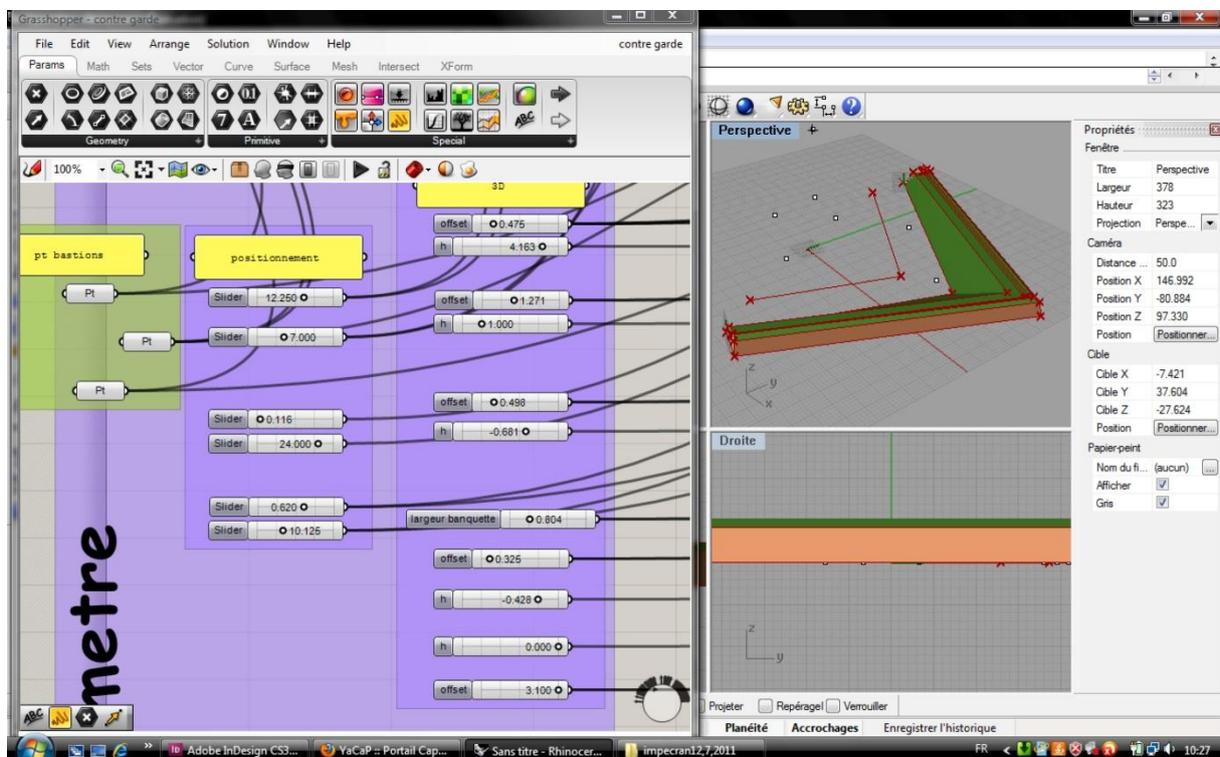
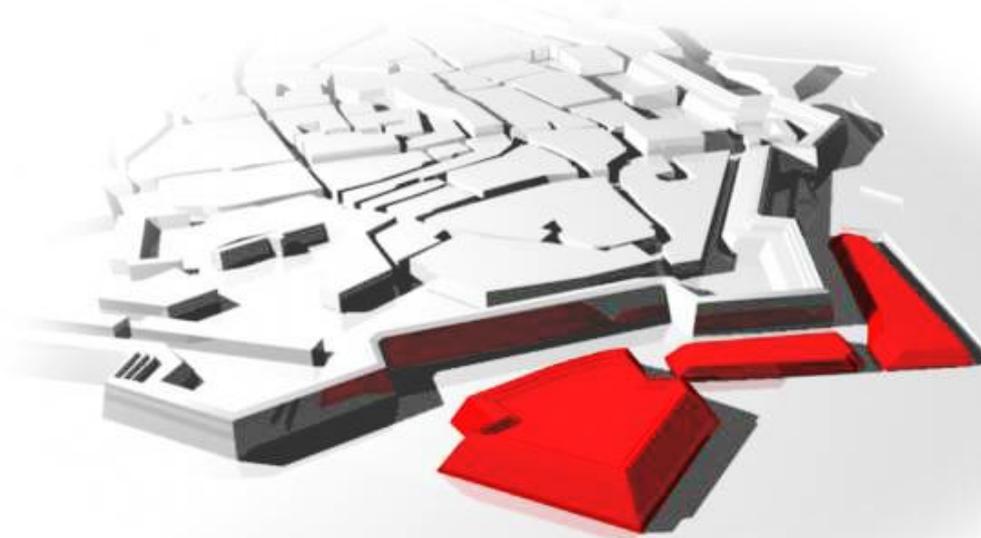


Figure 23 : Modélisation de la contre-garde de Toul. Le tracé de cet élément s'effectue à l'aide des trois points définissant le bastion (l'angle flanqué et les deux angles de l'épaule).

La tenaille étant un élément spécifique à Toul, son positionnement ainsi que sa géométrie sont parfaitement réglés. Dans le cas de la contre-garde, les paramètres sont réglés de façon asymétrique. Les angles DAG et STV sont réglables ainsi que la capitale de la contre-garde (droite (xC)). Le modèle ne tient pas compte du fossé coupant la face CV de la contre-garde.

La contre-garde pose des problèmes lorsque l'on modélise les fortifications d'une ville selon la méthode « front par front ». En effet, la contre-garde est un élément compris simultanément sur deux fronts. Dans le modèle effectué sur Grasshopper, la contre-garde est un élément rajouté après la modélisation complète du système de fortification (voir chapitre 5.4 Modélisation globale suivant la méthode front par front).

Dans le cas de Toul, un autre paramètre est à prendre en compte. En effet, la géométrie de la contre-garde est modifiée par le système d'inondation mis en place. Le modèle paramétrique effectué lors de ce stage ne prend pas en compte les modifications engendrées par l'interpénétration de 2 éléments entre eux mais devrait être par la suite le sujet d'un important travail. Nous pouvons déceler à Toul 3 éléments modifiés selon ce principe : La contre-garde, la demi-lune 48 ainsi que la demi lune 52 (voir chapitre 6.1.1. Cas non traités).



*Figure 24 : Demi-lune 48 et contre-garde*

Ces objets n'ont pas été modélisés d'une part car ils sont très ponctuels et leurs modélisation sur Grasshopper serait extrêmement complexes.

## 5.2 Les fossés

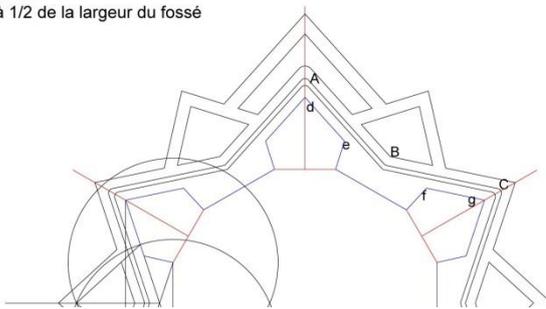
### 5.2.1 Cunette

La cunette est un canal artificiel creusé dans les fossés d'une ville fortifiée. Son dessin théorique est relativement simple, mais à Toul, les éléments des dehors mis en place change ce tracé. Lors de ce stage, seul son positionnement théorique a été modélisé.

« Rien de plus simple que cette construction. »

Le Blond, Éléments de fortification.

Cas 1: Théorie  
AB // de à 1/2 de la largeur du fossé



Cas 2: Toul  
AB // gh  
BC // hi  
CD // ij

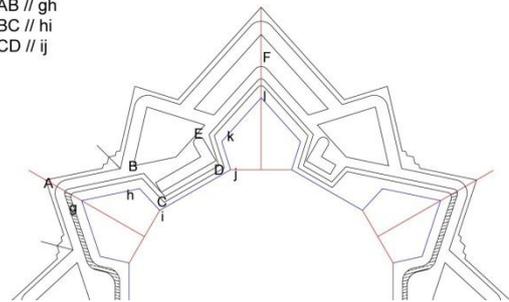


Figure 25 : Construction de la cunette dans les fossés

Le cas numéro 1 montre la manière de tracer la cunette autour de la place forte. La géométrie de celle-ci ne varie pas quelque soient les éléments présents dans les fossés (principalement des tenailles). Or, nous nous rendons compte dans le cas numéro 2, illustrant les variantes présentes à Toul, que les règles de tracé ont été modifiées. Nous savons que les ingénieurs Nègre et Treuré ont participé la réfection des systèmes d'inondation dans le courant du 18<sup>e</sup> siècle. Il se peut que ces ingénieurs aient modifié les plans de Vauban. Un deuxième point est à souligner concernant l'organisation des fossés de Toul, il s'agit de la présence majoritaire de traverses et non pas de tenailles dans ces fossés. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces talus ne comportent pas de parties maçonnées, ils sont donc d'un coût moins important et sont moins difficiles à mettre en œuvre que les tenailles, tout en jouant le même rôle défensif.

La géométrie de ces traverses (voir ci après 5.2.2 Talus et traverses) ne permet pas le tracé « normal » de la cunette.

Les traverses présentes dans les fossés de Toul soulèvent plusieurs questions. Elles mettent d'abord en évidence la multitude des personnes ayant travaillé ensemble sur les fortifications : les idées de chacun de ces concepteurs se « chevauchent » sur un même site. Selon notre méthode, dans laquelle l'analyse des principes théoriques de fortifications est à la base du travail de modélisation, il conviendrait d'étudier un ensemble plus vaste de traités de fortification et de ne pas se restreindre aux seuls travaux de Vauban.

### 5.2.2 Talus et traverses (annexes p48)

Ces éléments se retrouvent partout dans les systèmes de fortification. Ils peuvent être totalement indépendants ou rattachés au rempart, demi-lune, chemin couvert. Ils peuvent être classés en 3 types.

Type 1:

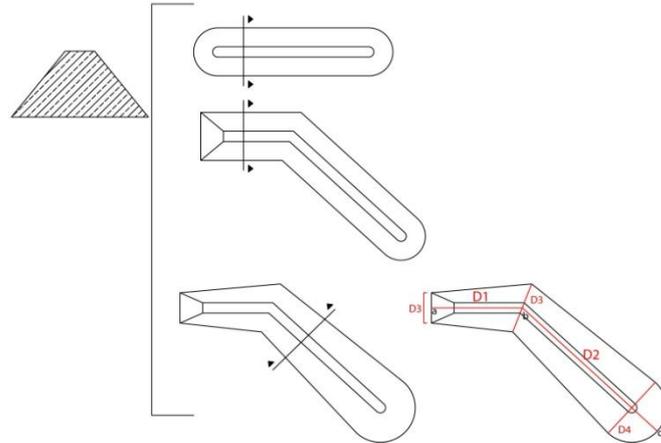
présents dans les fossés ou sur d'autre éléments: demi-lune notamment.

Les variables sont:

les longueurs  $D1$  et  $D2$

Les largeurs aux 3 points d'articulation:  $D3$   $D4$   $D5$

l'angle  $abc$

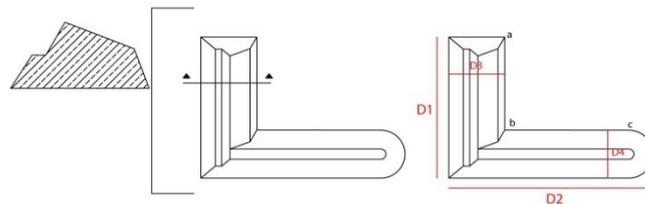


Type 2:

présents dans les fossés uniquement: possède une banquette (cf dimension du rempart en coupe)

$abc=90^\circ$

variables:  $D1$   $D2$   $D3$   $D4$



Type 3: traverses

présents sur le chemin couvert et les remparts du corps de place: présence de banquettes sur un des cotés.

variables:  $D$  et  $D1$

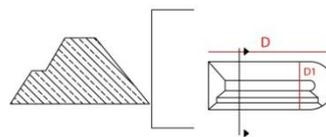


Figure 27 : Construction des talus et traverses (paramètres en coupe en Annexe)

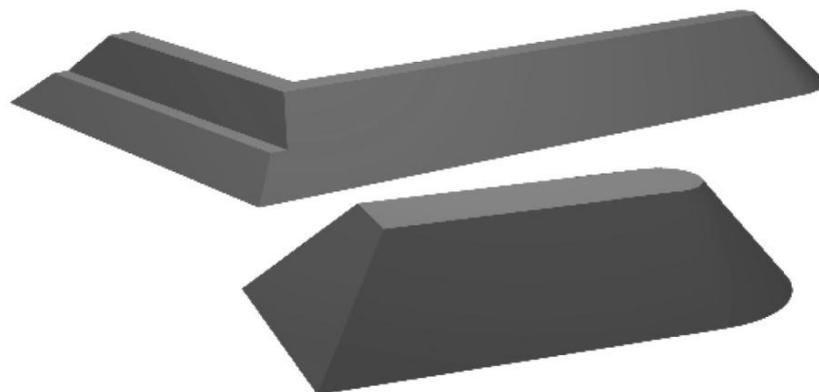


Figure 28 : Modèle 3D d'un talus et d'une traverse paramétrés sur Grasshopper.

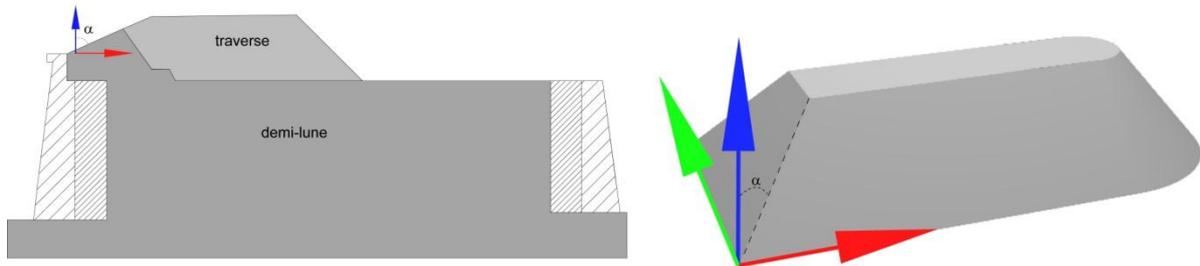


Figure 29 : exemple de traverse associée à une demi-lune. Dans le cas où la traverse est rattachée à un autre élément, l'angle  $\alpha$  prendra la mesure de l'escarpe ou de la contre escarpe de cet élément.

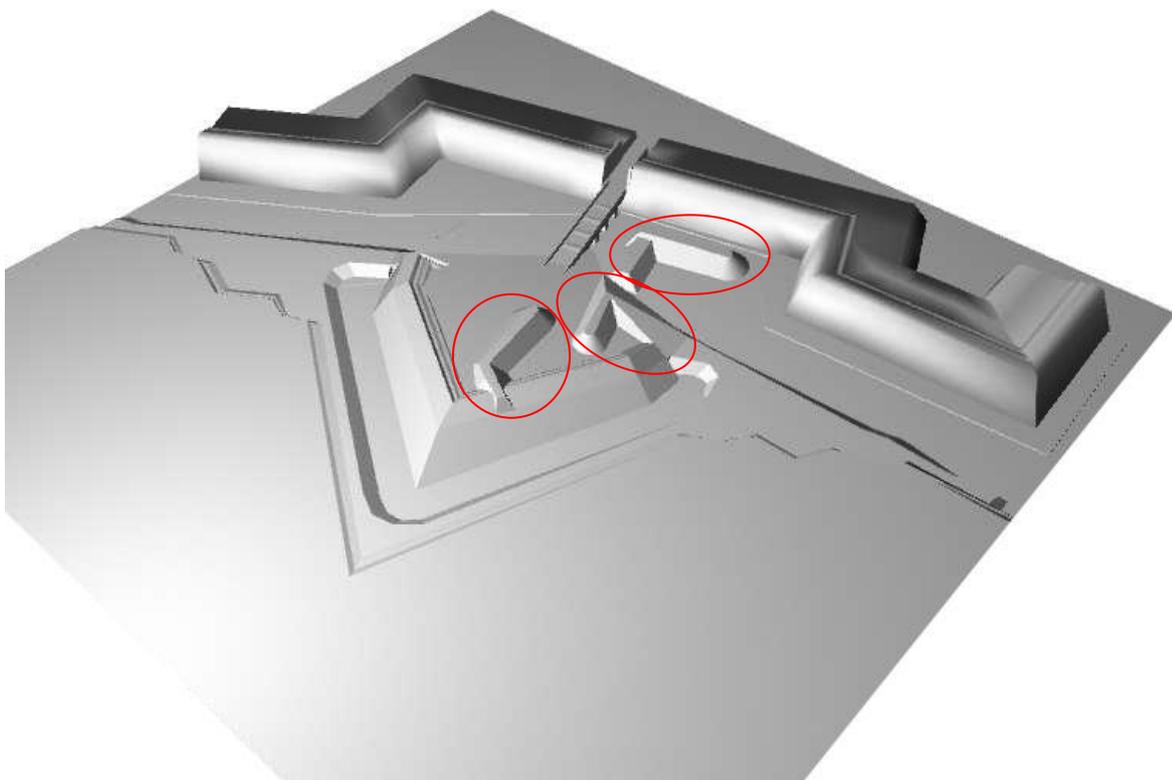


Figure 30 : Modélisation sur Maya du front bastionné 50. Nous remarquons ici les différentes positions que peut prendre un talus sur la fortification. Il peut être rattaché à une demi-lune, au chemin couvert ou placé dans le fossé. Il joue alors le même rôle qu'une tenaille.

### 5.3 Chemin-couvert, places d'armes et glacis (annexes p50)

Au sein d'un front bastionné, la place d'arme peut se construire de 2 façons différentes. Le cas 1 représente sa construction si une demi-lune est présente, l'autre cas montre la construction d'une place d'arme lorsque le front comporte une tenaille ou ne comporte pas d'éléments des dehors.

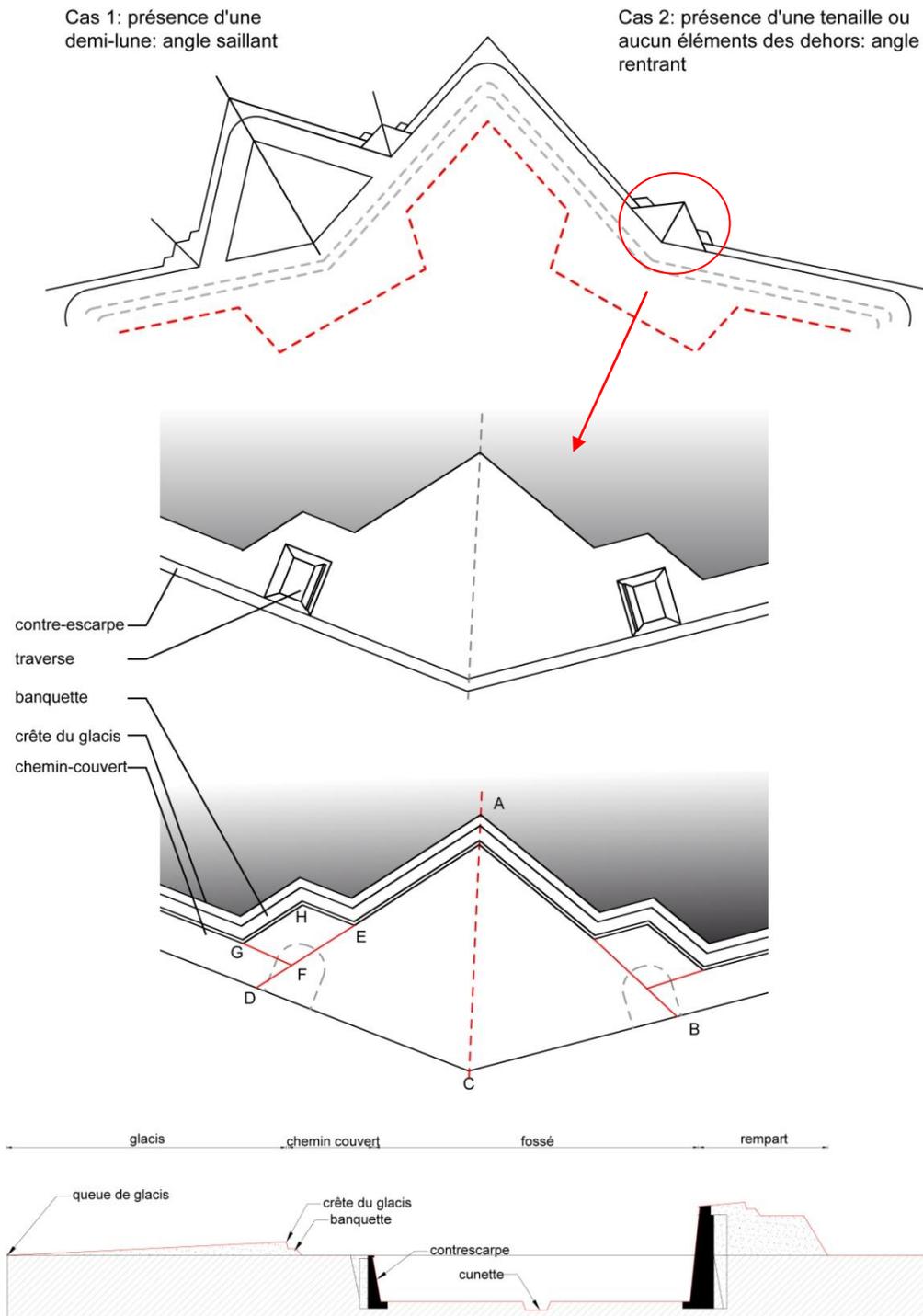


Figure 31 : Construction des places d'armes.

## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

Le tracé de la contre-escarpe s'obtient en traçant les parallèles aux lignes de défense à une distance égale à la largeur des fossés. Nous déterminerons alors une **distance CD** qui sera la largeur de la demi-gorge de la place d'arme. La **distance CA** est variable et représente la capitale de la place d'arme. Il s'agira ensuite de déterminer **FE** et **FG** pour obtenir l'emplacement des traverses. **DF** représente la largeur du chemin couvert,  $GH \parallel DA$  et  $HE \parallel FG \parallel CD$ . Les paramètres en coupe pour la construction de la banquette ne diffèrent en rien de ceux des remparts.

Le tracé du glacis s'obtient de la même manière que le tracé de la contre-escarpe, à une distance variable de **20 à 25 toises**, ce qui amènera le système de fortification à se terminer en pente douce jusqu'à la campagne.

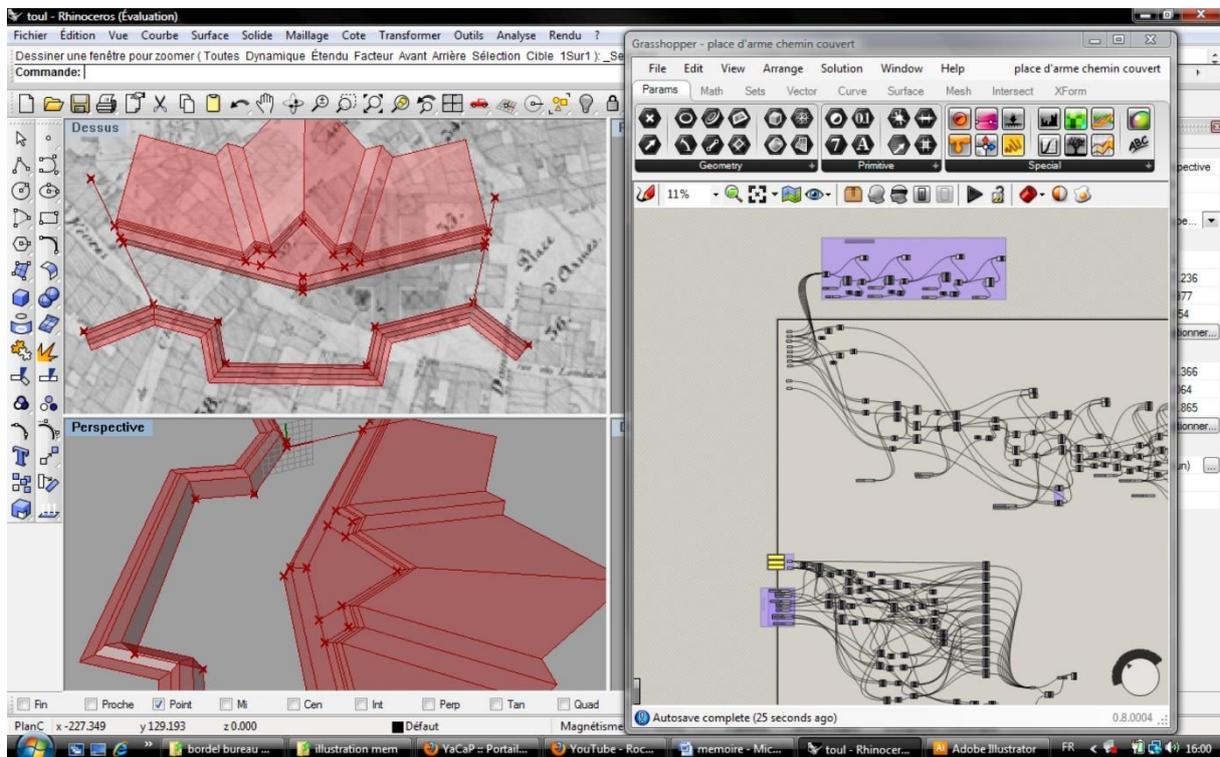
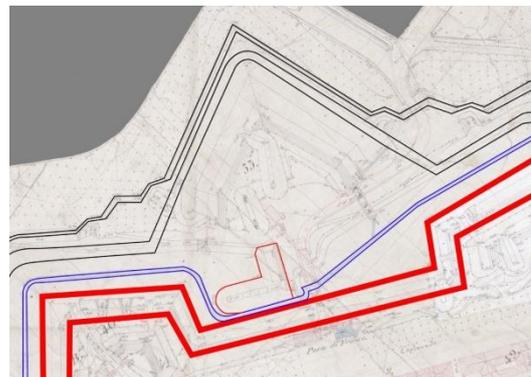


Figure 32 : maquette 3D d'un front bastionné simple de son chemin couvert et de la place d'arme.

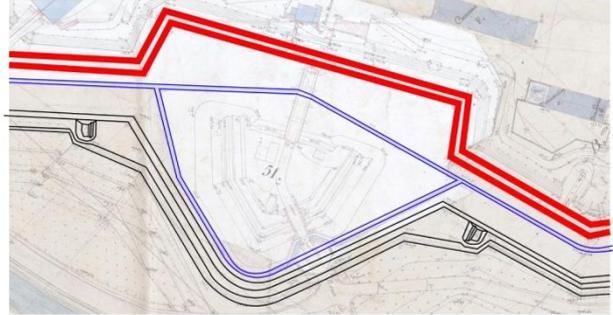
### Variantes présentes à Toul :

Nous remarquons à Toul très peu de cas correspondant aux traités théoriques. Tous n'ont pas été traités au cours de ce stage.

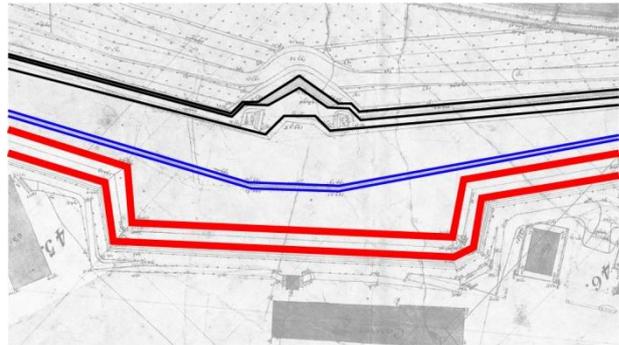
On peut notamment observer quelques changements de forme radicale dans les 3 cas ci-contre.



Dans le deuxième cas une seule traverse est mise en place, et la place d'arme ne se construit pas en fonction de sa capitale (jusqu'à présent génératrice de tout ouvrage en saillie (demi-lune, contre garde...))



Dans ce troisième cas, des demi-gorges viennent compléter le système. On remarquera aussi que l'emplacement des traverses est de dimension moindre que la normale et qu'aucune banquette n'a été construite à leur niveau.



Dans ce secteur particulier des fortifications de Toul, la contre-garde va influencer le tracé du chemin couvert et de la place d'arme. La place d'arme a alors une géométrie particulière, sans traverses, et dont l'angle saillant est sectionné.

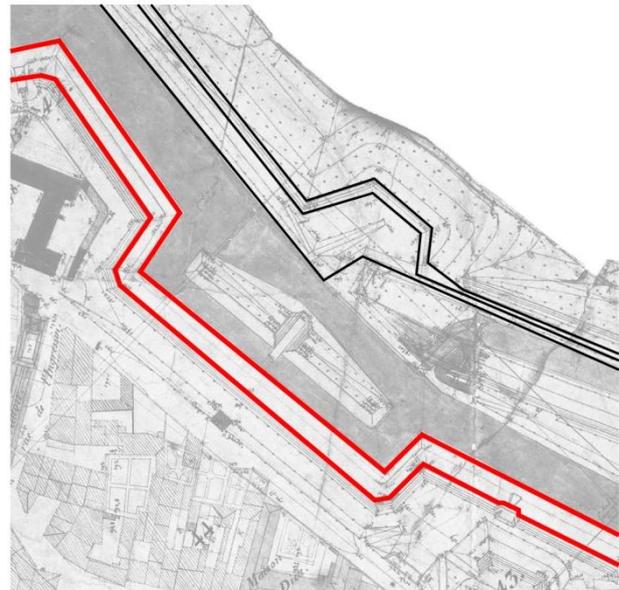


Figure 33 : Les différents cas de places d'arme à Toul

Malgré ces morphologies très variées, la géométrie de base du chemin couvert est récurrente dans les villes de Metz, Verdun et Marsal. Nous avons cependant remarqué sur Toul que l'angle GHE devra varier dans certains cas, modifiant ainsi les distances GF et FE. De plus, le parallélisme entre les faces des bastions et le tracé de la contre-escarpe n'est pas toujours respecté. Il conviendra alors de déplacer le point C sur la droite CA (modification de la valeur de l'angle rentrant de la place d'arme).

## 5.4 Modélisation globale suivant la méthode front par front :

### *Vers une automatisation de la modélisation de fortifications*

Quelques tests ont été effectués afin d'obtenir de façon rapide un assemblage des différents fronts bastionnés constituant l'intégralité des fortifications d'une ville. Ces tests ont permis de valider certaines hypothèses concernant notamment la facilité de modéliser n'importe quelle fortification de Vauban à l'aide de quelques éléments de bibliothèque seulement. Le modèle effectué sur Grasshopper reste un prototype incomplet : seuls les éléments présents à Toul ont été traités et sont disponibles dans la bibliothèque. Les ouvrages à cornes, les lunettes, les ouvrages à couronne... etc...n'ont pas été modélisés.

Le schéma ci-dessous illustre les différentes manipulations à effectuer sur la maquette numérique. L'utilisateur sélectionne dans un premier temps le front bastionné qu'il souhaite traiter. Lors de cette phase, il devra décider quels éléments seront mis en place : demi-lune seul, tenaille seul, demi-lune et tenaille, ou rien du tout. Il choisira le type de demi-lune et le type de tenaille. A chaque phase, il a la possibilité d'agir sur l'élément d'architecture en lui-même (simple, à flanc, demi gorge, Cavalier, Passage), mais aussi sur son positionnement par rapport aux remparts. Dans une dernière phase, le chemin couvert est généré automatiquement et suit 2 logiques. Si une demi-lune est présente, l'angle en vis-à-vis de la courtine sera un angle saillant, si une tenaille seul est présente ou aucun élément des dehors, le chemin couvert sera généré avec un angle rentrant.

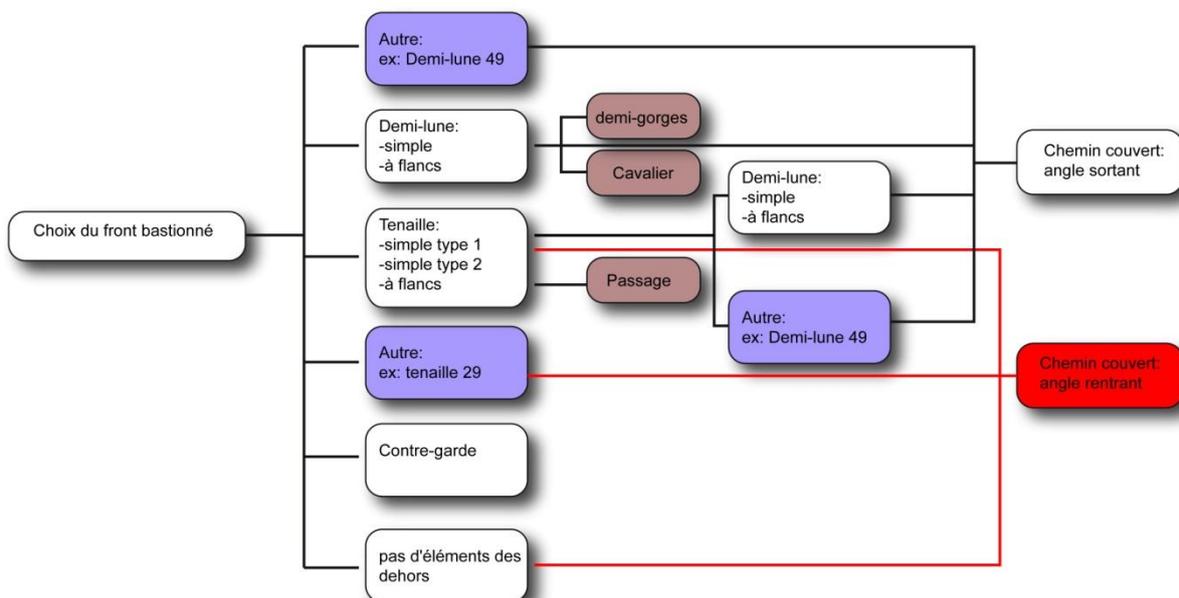


Figure 34: fonctionnement de la maquette numérique effectuée sur Grasshopper. En blanc figure les éléments « standards », en bleu les éléments spécifiques à chaque ville.

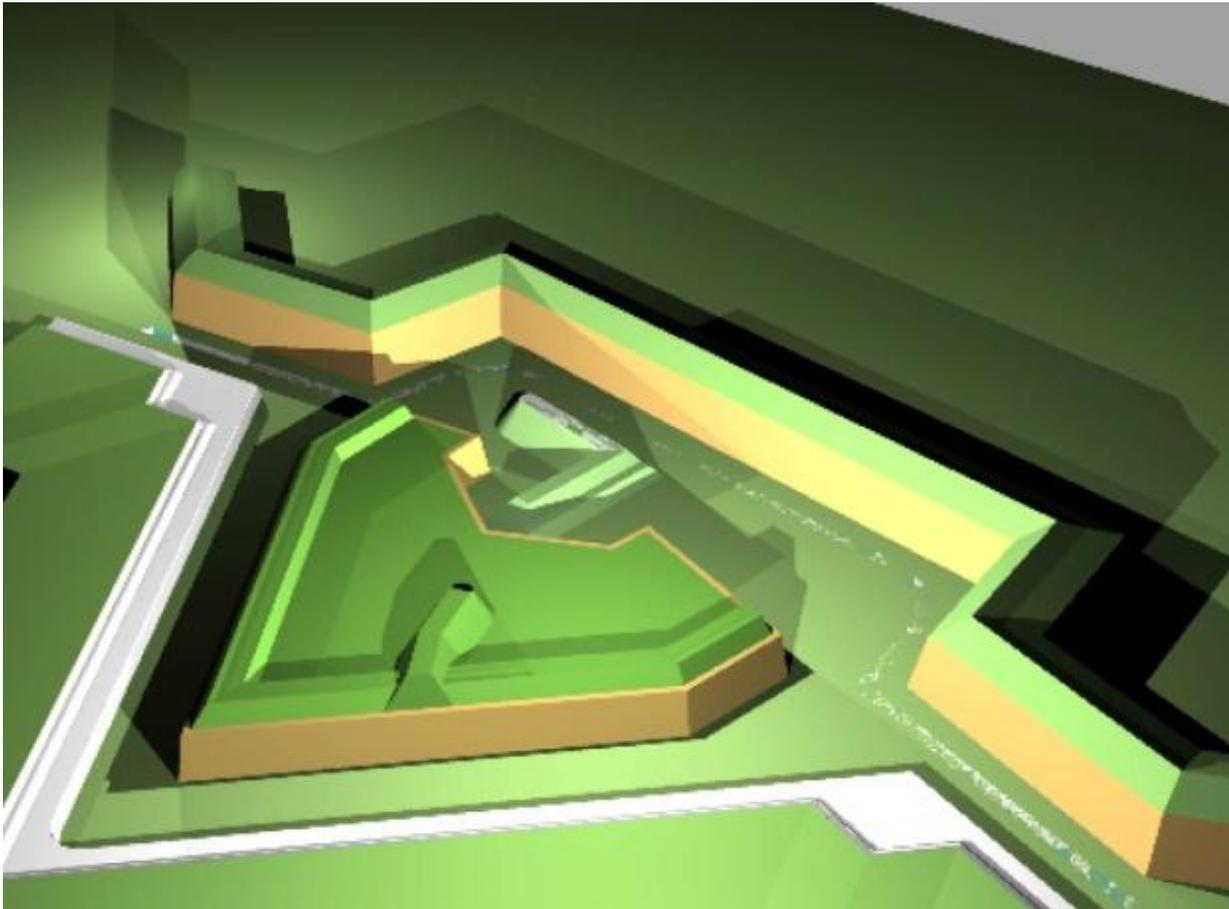
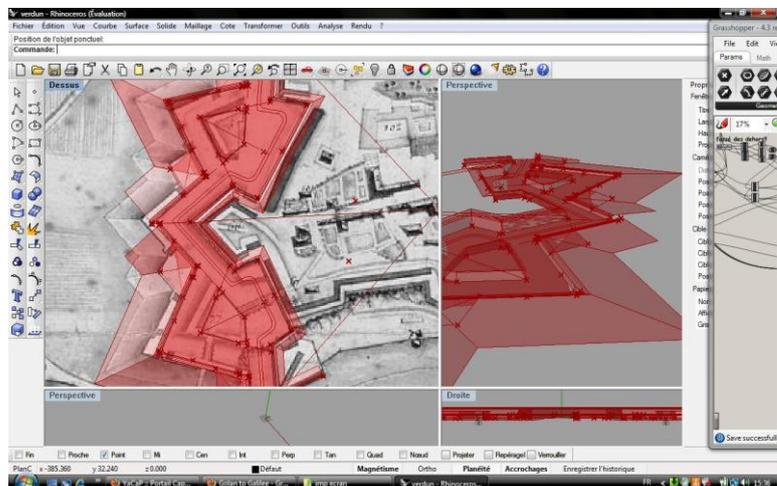


Figure 35 : Modélisation d'un front bastionné façon Toul (demi-lune 47).

Ce front se compose d'une demi-lune à flanc et talus, talus dans le fossé et demi gorges. Le modèle prend en charge le positionnement et la géométrie de la demi-lune, les largeurs de fossés, la position théorique de la cunette, le nombre de talus présents sur la demi-lune. Seul le positionnement du talus dans le fossé s'effectue manuellement à l'aide des points abc. Cette maquette 3D de ce front en particulier est très fidèle au modèle réel mais de nombreuses variantes ne sont pas prises en compte (exemple chapitre 5.2.2 Talus et traverses, figure... du front bastionné 50).

Figure 36 : Grasshopper nous permettra ensuite d'assembler les différents fronts bastionnés en une seule maquette numérique (ici sur le plan de Verdun).



## 5.5 Principe général

Afin d'illustrer le principe générale de tracé des fortifications, nous nous appuyons sur un type d'ouvrage des dehors particulier présent à Metz, l'ouvrage à cornes de la Citadelle.



Figure 37 : vue en plan de l'ouvrage à corne de la citadelle à Metz.

Les différents éléments composants cet ouvrage à corne montre la répétition d'un même schéma constructif. Le schéma de base « demi-lune » « contre garde » « lunette » est répété et associé à de nouveaux éléments. Les méthodes de construction de la première couronne s'appliqueront indéfiniment et invariablement. Si les deux faces d'un bastion définissent les directrices d'une contre garde, une demi-lune pourra elle aussi générer par ces faces une autre contre garde.

En réalité, on se rend compte qu'un même élément peut servir à plusieurs endroits sur le plan, moyennant des variations de taille, et en gardant ses paramètres de positionnement ainsi que sa méthode de construction. Seules les valeurs dites « par défaut » changent.

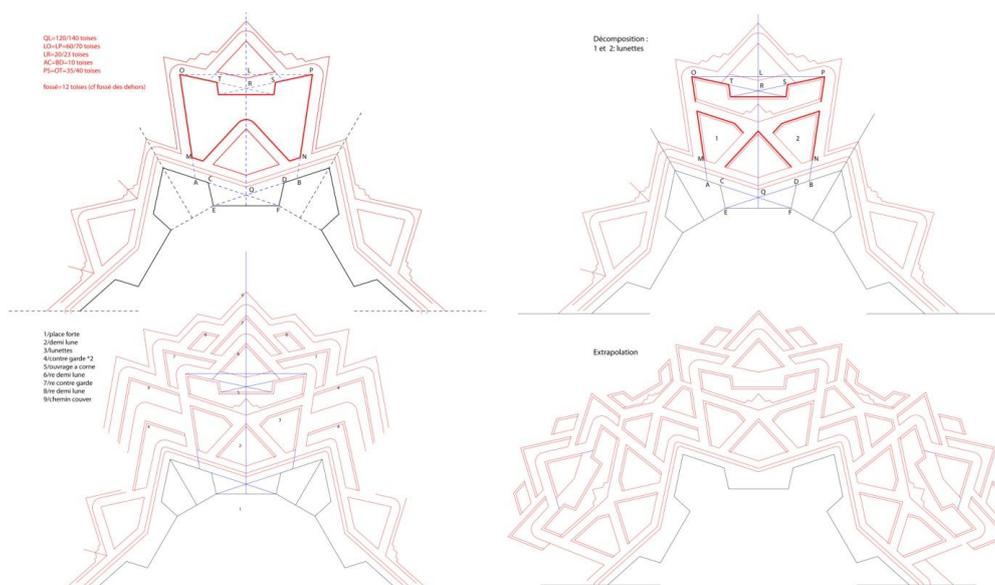


Figure 38: décomposition d'un ouvrage à corne type ouvrage à corne de la citadelle, Metz et extrapolation de ce système à plusieurs fronts bastionnés.

Principe général de la coupe :

Tout élément de fortifications peu importe sa nature ou sa position est destiné à abriter des soldats à un moment ou à un autre. Ainsi la partie comportant la banquette et le parapet est réglée en fonction de la taille d'un homme et est identique partout. Ces dimensions varient seulement d'un ingénieur à un autre. La hauteur varie entre 1 pied et pied et demi, la largeur entre 1 pied et demi et 4 pieds (voir annexes tableau de valeur). D'après « La véritable manière de fortifier de Mr Vauban », par l'abbé du Fay et le Chevalier de Cambray, le profil d'un rempart peut contenir deux banquettes : « Une pour les grands et une pour les petits soldats ». Il sera donc à prévoir la présence de plusieurs banquettes dans certains cas.

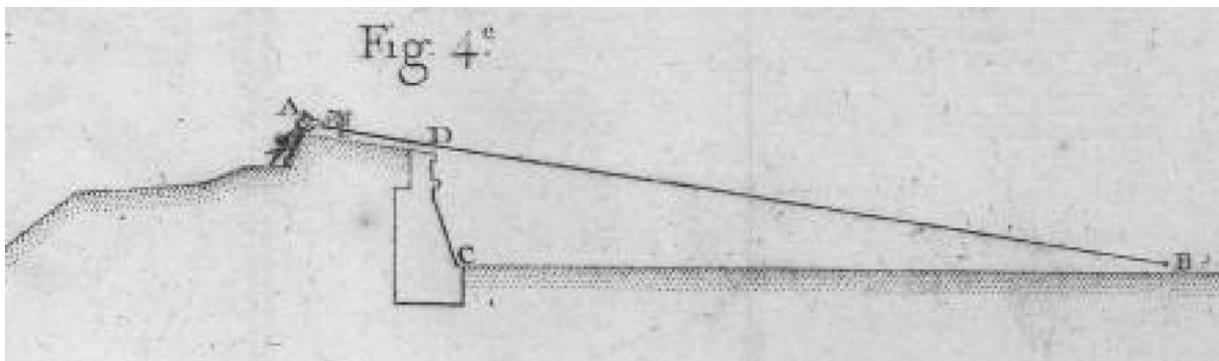


Figure 39 : profil de coupe valable sur tous les éléments de fortification.

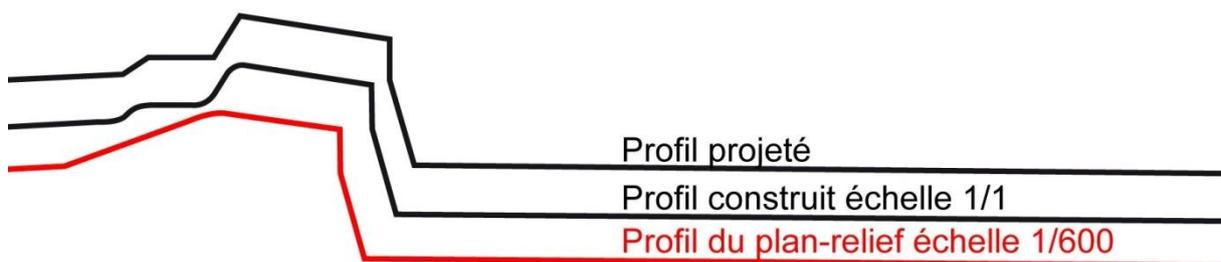


Figure 40 : représentation du profil en coupe à différents niveaux de représentation. Les banquettes sont des degrés installés dans le terrain. Ils mesurent en moyenne une quarantaine de centimètres selon la théorie. La question se pose alors de savoir quelle attitude adopter face à ces détails de construction. La banquette devenant quasi inexistante à l'échelle du plan-relief (voir 6.1.1 Cas non traités).

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### 6.1 Conclusion

Le travail présenté a pour objectif de montrer notre approche quant à la modélisation paramétrique d'objets architecturaux complexes et met en évidence de nombreux problèmes, qu'ils soient liés à la méthode en elle-même ou aux logiciels utilisés.

Nous nous rendons compte lors de la phase de test qu'une grande partie des différences entre la maquette numérique réalisée et le plan relief sont dus à des dissymétries. Régler ces différences minimes est très simple mais revient à rajouter un nombre considérable de paramètres (il conviendrait presque de multiplier par deux chacun des paramètres explicités dans les traités de fortifications). Ceci entraînerait donc beaucoup de complications pour l'utilisateur. D'autres cas par contre n'ont pas été abordés lors de ce stage.

#### 6.1.1. Cas non traités

-Ces travaux s'appuient uniquement sur la façon de concevoir de Vauban rapportée par Le Blond. Les fortifications d'une ville évoluaient avec le temps et sont l'œuvre d'une multitude d'acteurs. Afin de constituer une bibliothèque d'objets pouvant répondre à tous les besoins, il conviendrait naturellement d'étudier la manière de construire de tous les ingénieurs.

*« Un auteur qui pâroit avoir fait une étude sérieuse de tous les systèmes, dit qu'il y en a environ deux cents principaux, auxquels se rapporte tout ce que l'on a inventé jusque ici sur l'art de fortifier. »*

G. Le Blond, *Éléments de fortification*.

-Les modèles effectués au cours de ces travaux ne peuvent pas s'adapter aux différentes échelles de maquette pouvant être rencontrées. S'appuyant en grande partie sur la théorie, les modèles proposés montrent à voir les jeux de terrassement présents sur tout type de remparts (banquettes, talus) qui ne figurent pas sur le plan relief original (ech 1/600), (et qui, n'ont sans doute jamais été réalisés dans leur totalité durant les travaux de construction.)



*Figure 41 : à gauche : Les banquettes, détails absents en réalité, présent en 3D, à droite : écluses, détails de maçonnerie présents en réalité, absents en 3D.*

-La végétation fait partie intégrale du système de défense. Le placement de ces alignements ainsi que le nombre d'arbre qui les compose pourrait être pris en charge par le programme mais n'a pas été réalisé. Le positionnement de la végétation est expliqué dans les traités : essence végétale à mettre en œuvre, positionnement des alignements d'arbres afin d'optimiser les protections. La végétation reste cependant très difficile à intégrer au modèle paramétrique. Les alignements doivent être traités au cas par cas.

*Figure 42 : photographie d'une zone du plan relief comprenant les dehors. Si les alignements semblent extrêmement réguliers au niveau des remparts du corps de place et au niveau de la crête du glacis, la géométrie de la demi-lune ne permet pas de plantations aussi régulières.*



-Les dehors sont la partie la plus floue du système de fortification. Plus la distance des éléments au corps de place est importante, plus ceux-ci vont s'adapter à la nature du terrain au cas par cas. Ainsi, le tracé du glacis peut être figuré selon la théorie mais ne correspondra en rien, ni à la réalité, ni au plan-relief. La modélisation du glacis doit s'appuyer sur un tout autre type de méthode. La méthode employée en 2010 par le C.R.A.I. portait principalement sur l'acquisition par relevé laser du terrain. Cette méthode a permis d'obtenir un maillage en 3 dimensions, exploitable par la suite pour positionner les éléments de campagne (muret, arbres, vergers, parcelles viticoles...).

Figure 43 : l'interpénétration de différents éléments entre eux implique souvent des modifications dans la géométrie de ces éléments : exemple de la demi-lune 52. Le chemin couvert se prolonge à niveau dans le fossé et coupe le flanc de la demi-lune. Ces modifications très particulières ne sont pas prises en compte à cette étape du travail.



-Le modèle, même si il prend en compte le positionnement des éléments les uns par rapport aux autres, ne prend pas en charge leurs liaisons par les « communications ». Les communications peuvent engendrer des variations dans la morphologie des éléments (demi-lune 50). Il en va de même concernant les fossés (fossés coupant la face de la contre garde).

### 6.1.2 limite de la méthode

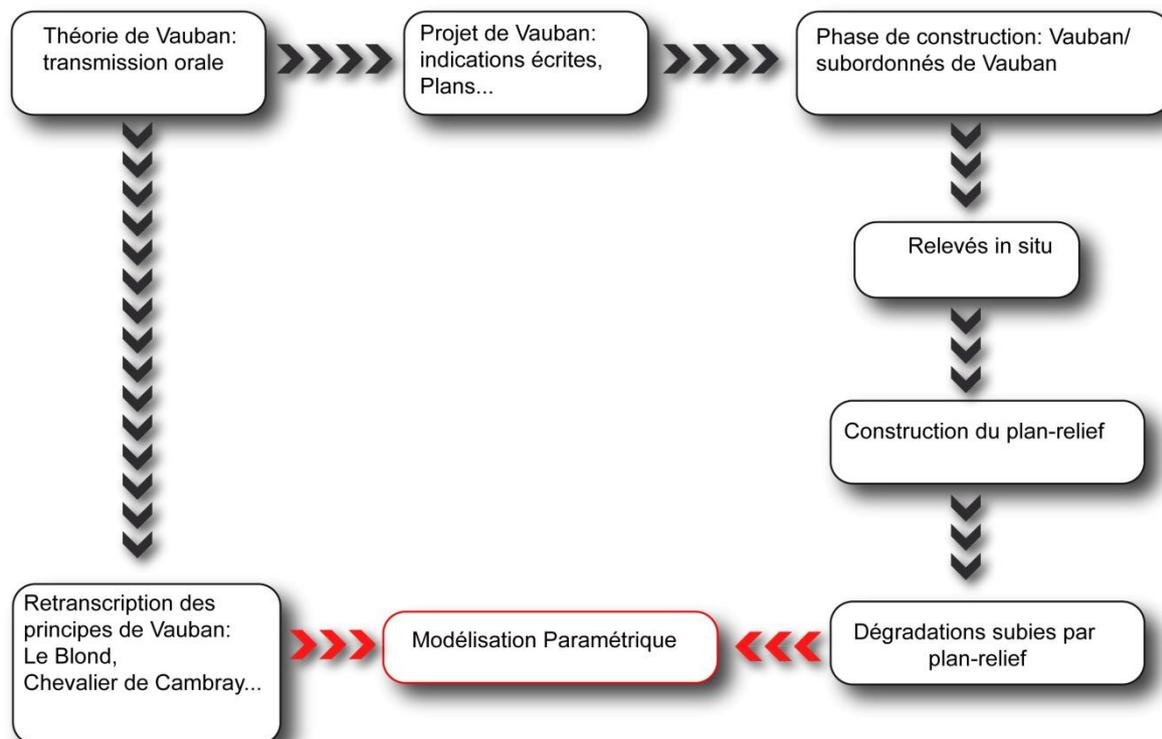


Figure 44 : Les différents éléments permettant la modélisation paramétrique des fortifications issue d'un plan relief.

La méthode employée au cours de ce stage pose un problème lié aux sources même d'où nous parviennent les indications utiles à la modélisation. En effet chaque acteur du projet utilise ses propres outils relatifs à son métier, et opère en fonction de sa compréhension d'un principe général, le tout à différentes échelles de projet.

Ainsi, à chaque acteur peut être liée une série d'interprétations entraînant des erreurs possibles, s'éloignant à chaque fois un peu plus de la théorie de Vauban. Notre travail intervient « en bout de chaîne », c'est-à-dire qu'il subit toutes les erreurs ou inexactitudes commises en amont.

## 6.2 Perspectives

Certains aspects semblent très encourageants. Notamment la faculté d'adaptation du modèle à quelques autres villes « test » : Verdun, Marsal, Metz. Même si l'historique de ces villes n'a pas été pris en compte, il semblerait que les méthodes de construction soient très similaires.

L'étude des fortifications met en évidence la rigueur des ingénieurs et des constructeurs de l'époque, ce qui facilite le travail de modélisation et limite le nombre des variables. D'une manière générale, en augmentant ce nombre de variable, on augmente la précision (voir 6.1 conclusion).

La topographie joue un rôle fondamental dans la conception des systèmes de fortification. Même si « l'idéal » des ingénieurs reste un terrain uniformément plat fortifié de façon régulière (pentagone, hexagone...), et dont les fronts disposent tous des mêmes éléments des dehors, la modélisation de nombreuses villes ne peut pas être appréhendée de la sorte (voir Figure 45).



Figure 45 : Photo aérienne de la ville de Briançon

Si lors de la modélisation paramétrique du plan relief de Toul de nombreuses différences entre le tracé théorique et la réalité existent, qu'en serait-il de la même méthode de travail affectée au plan relief de Briançon ? On peut penser que les différences entre théorie et réalité seraient encore plus prononcées que sur le plan-relief de Toul. Des tests sur d'autres villes, et effectués à une plus grande échelle que lors de ce stage (test sur l'intégralité de la ville et non sur des éléments singuliers) permettraient de vérifier l'efficacité de cette méthode.

Enfin, à l'heure actuelle, il semble indispensable de revenir manuellement sur certains éléments, avec des outils tels Maya ou 3DS MAX, le glacis notamment. Bon nombre de subtilités de ces ouvrages sont en effet dues à une réelle attention portée au terrain par les ingénieurs et une forte adaptation au site des principes théoriques.

*«Lorsque l'on fortifie une place, il ne doit point être question de suivre aucun système exactement et scrupuleusement. Les plus grands ingénieurs ont diversifié leurs méthodes, suivant les temps et les lieux. Il ne s'agit que de posséder parfaitement toutes les règles générales et particulières de la fortification, et de les appliquer avec intelligence, en profitant de tous les avantages que le terrain peut procurer aux différentes places qu'on veut fortifier. Comme il ne peut y avoir rien de précis ni de déterminé sur un sujet si varié, c'est au génie à y suppléer avec toute la prudence que mérite l'importance de l'objet.*

*Il nous paroît que dans ces fortes de cas, il faut imiter la sagesse des anciens Ingénieurs, c'est-à-dire, de prendre garde de se livrer à des idées trop dispendieuses, qui donneroient une enceinte difficile à bien défendre. »*

G. Le Blond, *Eléments de fortification*, 1786

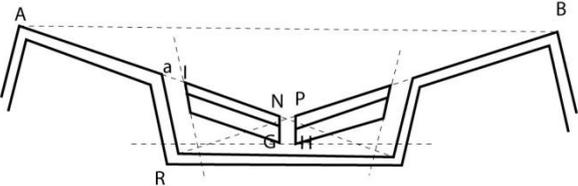
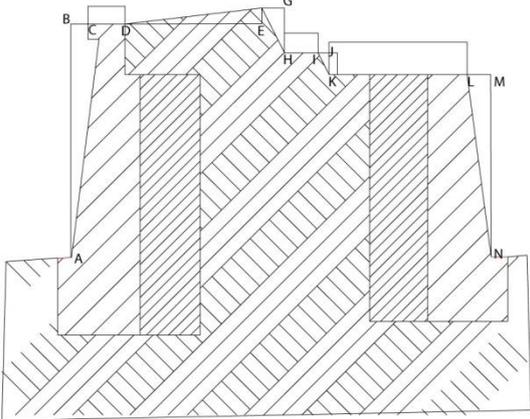
Remerciement : C. Chevrier, K. Jacquot, A. Kriouche

## 7. Annexes

(En rouge figurent les valeurs par défauts non renseigné par les traités et donc déduite de l'état existant du plan-relief)

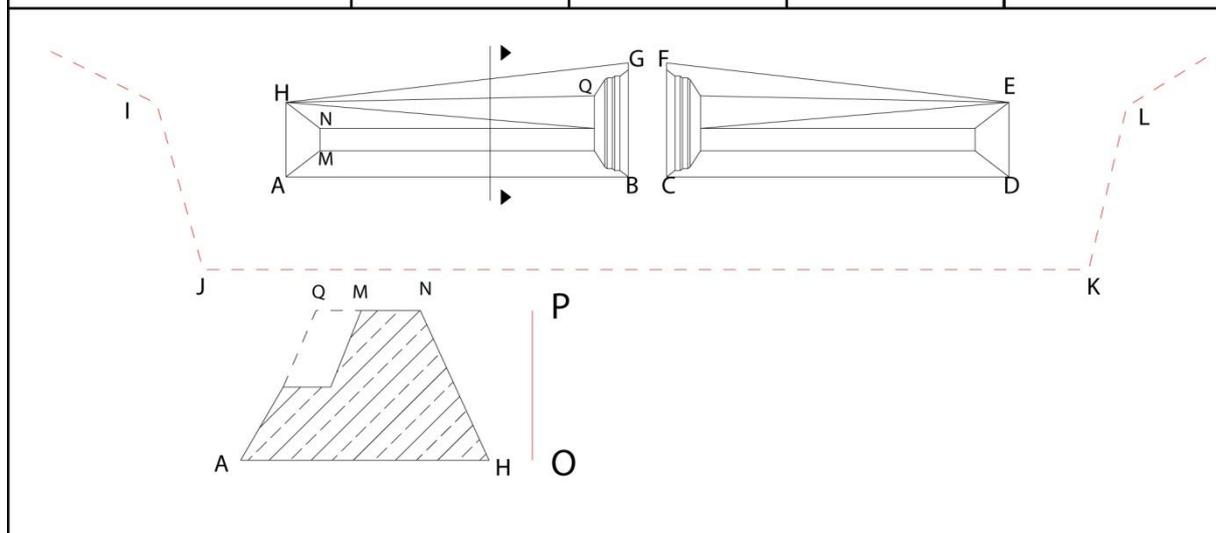
	Paramètres	description	Type	valeur par défaut	
Tenaille simple	PLAN	Distance al	largeur fossé latéral	réel	5 toises
		distance (RS) (GH)	largeur fossé	réel	3 toises
COUPE		longeur AB	hauteur	réel	5 toises
		longeur BC	décalage maçonnerie	réel	3 pieds
		longeur CD	épaisseur maçonnerie	réel	3 pieds
		longeur DE	largeur parapet	réel	3 toises
		longeur FG	Defini la pente du parapet	réel	4 pieds
		longeur GH	hauteur du parapet	réel	4 pieds et demi
		longeur HI	largeur de la banquette	réel	5pieds
		longeur IJ	Defini la pente de la banquette	réel	5pieds
		longeur JK	hauteur de la banquette	réel	2 pieds et demi
		longeur KL	Largeur du terre-plein	réel	2 toises
		longeur LM	décalage maçonnerie	réel	3 pieds
		longeur MN	Hauteur face arrière	réel	4 toises 3 pieds

## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

Tenaille à flancs		longueur IN	Defini la dimension du flanc	réel	N milieu de [IM]
PARAMETRES EN COUPE IDENTIQUES A LA TENAILLE SIMPLE					
<p>paramètres en coupe valables pour tous les éléments des dehors à l'exception de la hauteur totale</p> 					
présence d'un passage	longueur NP	Defini la Largeur du passage	réel	3 toises	

## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

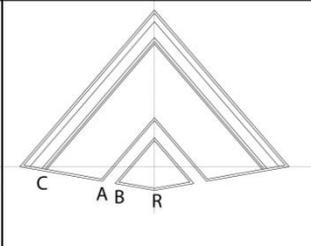
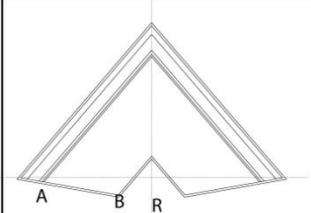
	Paramètres	description	Type	valeur par défaut	
Tenaille de Toul	PLAN	distance (JK) (AD)	largeur fossé	réel	5 toises
		distance (IJ) (AH)	largeur fossé latéral	réel	3 toises
		Distance AH	largeur extrémité	réel	2.5 toises
		Distance BG	largeur centrale	réel	5 toises
		Distance BC	largeur passage	réel	3 toises
	COUPE	Distance OP	hauteur totale	réel	2 toises
		Distance AH	largeur à la base	réel	2 toises
		Distance MN	largeur au sommet	réel	5 pieds

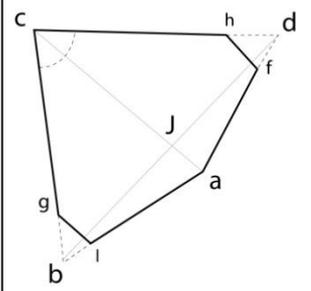


## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

	Paramètres	description	Type	valeur par défaut	
demi-lune simple  PLAN   COUPE	longueur HP	rayon	réel	5/6 toises	
	longueur PN	largeur fossée	réel	15/20 toises	
	angle bcd	angle saillant de la demi-lune	réel	min: 60° max:90°	
	Hauteur AB	Hauteur maçonnerie	réel	23 pieds	
	longueur BC	Décalage maçonnerie	réel	7 pouces	
	Hauteur CD	Hauteur à la crête du talus	réel	3 pieds	
	longueur DE	largeur du parapet	réel	3 toises	
	Hauteur EF	hauteur de la banquette	réel	4 pieds et demi	
	longueur FG	défini la pente de la banquette	réel	1 pieds et demi	
	Hauteur GH	hauteur de la banquette au terre plein	réel	2 pieds et demi	
	longueur HI	défini la 2ème pente	réel	5 pieds et demi	
	longueur GJ	défini la largeur de la banquette	réel	3 pieds et demi	
	demi-lune à flanc	longueur bg	détermine les flancs de la demi-lune	réel	
longueur bl			réel	7 toises	
cavalier	longueur BD	distance du cavalier au parapet	réel	5/6 toises	
	hauteur		réel	1 toise et demi	

## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

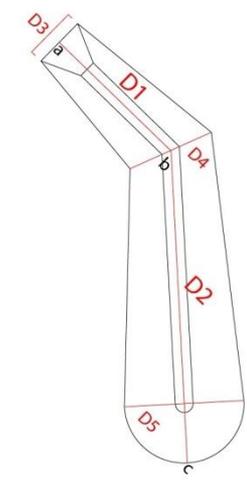
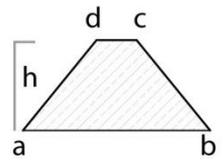
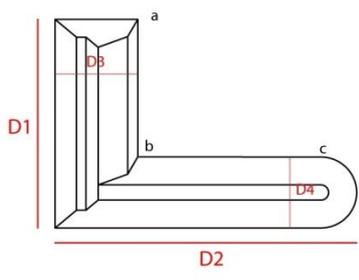
Réduit	longueur AB	Largeur du fossée	réel	3 toises	
	longueur AC	distance du réduit au parapet	réel	5/6 toises	
	hauteur		réel	"légèrement plus haut que la hauteur du terre plein de la demi-lune"	
demi-gorges	longueur AB	distance de la demi-gorge au parapet	réel	5/6 toises	

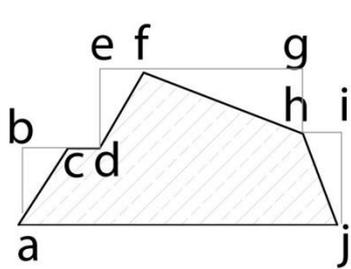
	Paramètres	description	Type	valeur par défaut	
demi-lune: paramètres à modifier	longueur bg	détermine les flancs de la demi-lune	réel		
	longueur bl		réel		
	longueur aj	détermine les demi-gorges de la demi-lune	réel		
	présence de Talus		boobléen	0	
	nombre de talus		réel	0	
	Géométrie des flancs		choix	-droits -arrondis (orillons)	

## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

	Paramètres	description	Type	valeur par défaut
contre-garde <b>PLAN</b>	distance d	largeur fossé	réel	18/20 toises
	distance AD	largeur contre-garde	réel	16 toises
	<b>PARAMETRES EN COUPE IDENTIQUES A LA TENAILLE SIMPLE</b>			
paramètres à modifier <b>PLAN</b>	angle GAD	si pas de demi-lune	réel	<b>90°</b>
	angle xC	angle capitale contre-garde	réel	<b>0°</b>
	distance BC	longueur capitale contre-garde	réel	<b>20 toises</b>

Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

		Paramètres	description	
Talus et traverses type 1	PLAN	D1	longueur	
		D2		
		D3	largeur	
		D4		
		angle abc		
	COUPE	distance ab		
		distance dc		
		h		
type 2	PLAN	D1	longueur	
		D2		
		D3	largeur	
	D4			
	angle abc			
				

type 3	COUPE	distance ab	hauteur banquette	
		distance bc	pente	
		distance cd	largeur banquette	
		distance de	hauteur à la crête	
		distance ef	pente	
		distance fg	largeur parapet	
		distance gh	pente	
		distance hi	pente escarpe	
		distance ij	hauteur escarpe	
		type 3	PLAN	
D1	largeur			
Paramètres en coupe identiques au type 2				

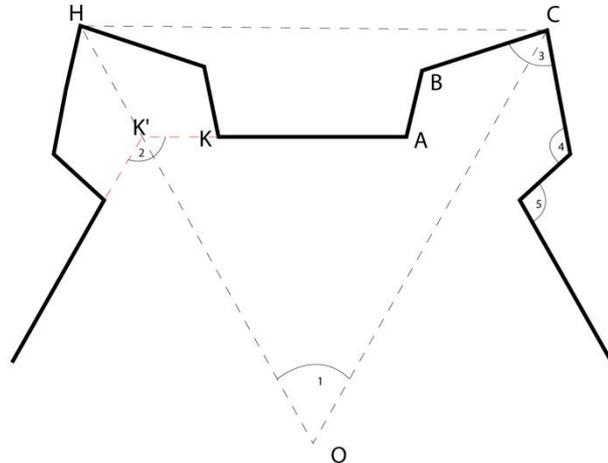
## Modélisation paramétrique de plans-reliefs datant du XIXe siècle

	Paramètres	description	Type	valeur par défaut	
place d'arme, chemin couvert	PLAN	distance CA	capitale de la place d'arme	réel	
		distance CD	demi-gorge de la place d'arme	réel	16 toises
		distance DE	profondeur de la traverse	réel	5 toises
		distance DE	largeur de la traverse	réel	10 toises
			largeur du chemin couvert	réel	5/6 toises
	coupe		hauteur de la contre escarpe	réel	3 toises
			hauteur de la banquette	réel	2 pieds et demi
			largeur de la banquette	réel	5 pieds
			hauteur de la banquette à la crête du glacis	réel	4 pieds et demi
			étendue du glacis	réel	20/25 toises
place d'arme, chemin couvert, paramètres à modifier	présence de traverses		booléen	1	
	Forme de la traverse		choix	-droit -arrondi	
	orientation de la capitale de la place d'arme		réel	0°	

## 7. Lexique

- Nomenclature de la géométrie d'un front bastionné :

AB-flanc du bastion  
 BC-face du bastion  
 AK-courtine  
 HC-coté du polygone extérieur  
 HC-ligne de défense (portée du mousquet)  
 KK'-demi gorge  
 K'H-capitale du bastion  
 OH-rayon extérieur  
 OK'-rayon intérieur



1-angle du centre du polygone  
 2-angle du centre du bastion  
 3-angle flanqué  
 4-angle de l'épaule  
 5-angle du flanc

- **Arretes (glacis, talus)** : arretes vives formant le sommet des ouvrages de fortifications
- **Avant chemin couvert** : second chemin couvert pratiqué au delà de l'avant fossé
- **Avant fossé** : second fossé creusé parallèlement au pied du glacis
- **Banquette** : degrés que l'on construit au pied des parapet pour élever le soldat et lui donner la possibilité de tirer par-dessus
- **Barbette** : élévation de terre sur laquelle vient se positionner un canon
- **Bastion** : ouvrage de terre revêtu de maçonnerie ou de gazon, en saillie d'une enceinte
- **Batardeau** : digue en maçonnerie limitant la partie en eau d'un fossé
- **Berme ou relais** : retrait que l'on pratique entre le pied du rempart et le fossé afin de retenir les terre du rempart et de les empêcher de s'écrouler dans le fossé
- **Capitale** : axe principal d'un ouvrage. La capitale d'un bastion est la bissectrice de son angle saillant
- **Caponniere** : ouvrage bas adossé à l'escarpe, défilé dans le fossé. Permet de défendre le fossé et sert de communication entre les différentes couronne d'une fortification
- **Casemate** : souterrain voûté pouvant accueillir de l'artillerie et servant à défendre un fossé
- **Caserne** : logement des soldats, généralement construit le long de la courtine
- **Cavalier** : ouvrage en terre plein portant de l'artillerie et placé sur un autre ouvrage dont il double les feux
- **Chemin couvert** : espace pratiqué sur le bord extérieur du fossé, couvert par le parapet du glacis
- **Commandement, commander** : se dit d'un ouvrage dominant un autre de par sa hauteur

- **Communications** : dans un système de fortification, se dit de tout chemin ou passage permettant de conduire d'un ouvrage à un autre
- **Contre forts** : Solides de maçonnerie rajouté au rempart du côté du terre plein pour l'aider à soutenir la poussée des terres
- **Contre garde** : ouvrage composé de deux faces couvrant celles du bastion
- **Contre mine** : galerie souterraine parallèle au flanc et au face des éléments de fortifications. Ouvrage servant à contrer les opérations de minages de l'assaillant, ainsi qu'à tout faire péter
- **Contre escarpe** : côté/paroi extérieur du fossé
- **Cordon** : rang de pierre arrondis qui saillent au delà du revêtement qui se trouvent au niveau du terreplein du rempart. c'est le niveau à partir duquel commence le parapet
- **Corps de place** : Enceinte principale d'une place
- **Courtine** : pan de muraille compris entre deux bastions
- **Cunette** : Canal établi au fond d'un fossé sec
- **Demi-lune** : dehors retranché placé devant la courtine et entièrement cerné de fossés
- **Escarpe** : paroi d'un fossé du côté de la place
- **Face** : côté d'un ouvrage exposé à l'ennemi
- **Flanc** : côté d'un ouvrage en retour sur une face, une courtine
- **Fossé des dehors** : fossé compris entre un ouvrage des dehors et le chemin couvert.
- **Front bastionné** : tracé dont toutes les parties se flanquent réciproquement. Comprend cinq lignes : les faces, les flancs de deux bastions et la courtine intermédiaire
- **Glacis** : plan faiblement incliné raccordant la crête du chemin couvert au niveau naturel du terrain
- **Gorge** : partie d'un ouvrage placée du côté le moins exposé, vers l'intérieur de la place
- **Lunette** : ouvrage construit en vis-à-vis des faces de la demi-lune. Il y en a ordinairement deux. Aussi appelé tenaillon
- **Orillon** : massif de plan semi-circulaire ou carré prolongeant sa face et en forme de lobe d'une oreille, destinés à couvrir les batteries de flanc
- **Parapet** : massif gazonné ou mur défilant les emplacements de tir à ciel ouvert
- **Réduit** : ouvrage construit à l'intérieur d'un autre où l'on peut se retrancher
- **Rempart** : enceinte formée par une levée de terre
- **Tenaille** : dehors bas placé devant la courtine
- **Tenaillon** : lunette
- **Traverse** : mur ou massif de terre construit en épis dans la largeur d'un chemin couvert ou d'un terre-plein de rempart.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

### Ouvrages :

- Cormontaigne, *Architecture militaire, ou l'art de fortifié*. Jean Neaulne et Adrien Moetjens, 1741
- Le Blond, *Eléments de fortification*. Paris : L. Cellot, 1786
- Mr l'Abbé Du Fay, Le chevalier de Cambray, *Véritable manière de fortifier de Mr De Vauban*. Amsterdam, 1689
- Sieur de Bitainvieu , *L'art universel des fortifications, Francoise, Hollandoises, Espagnoles Italiennes et composées*. Du Breuil, Jean. Paris 1674
- Nicolas Faucherre, *Places Fortes, Bastion du pouvoir*. Paris, Rempart, 1990

### Articles :

(5) GUIDI, G., FRISCHER, B., De SIMONE, M., CIOCI, A., CAROSSO, L., LOREDANA MICOLI, L., RUSSO, M., GRASSO, T., Virtualizing Ancient Rome : 3D Acquisition and Modeling of a large Plaste-of-Paris model of Imperial Rome, 2005, San Jose, Californie

(6) CHEVRIER, C., CHARBONNEAU, N., GRUSSENMEYER, P., PERRIN, J.P., Elaboration de nouvelles configurations à partir de cas existants du patrimoine bâti. Conception architecturale paramétrique, 2009, Nancy

HUMBERT, P., CHEVRIER, C., BUR, D., Use of a rzal time 3D engine for the visualization of a town scale model dating from the 19<sup>th</sup> century, Nancy

DYLLA, K., MULLER, P., ULMER, A., FRISCHER, B., Rome reborn 2.0: A framework for virtualcity reconstruction using procedural techniques. Proceedings of Computer Applications and quantitative Methodes in Archaeology (CAA), 2009

### Webographie :

#### Technologie Lidar :

<http://geospatialrevolution.psu.edu>

<http://www.aerodata-france.com/>

<http://www.riesonweb.com/2010/09/01/la-technologie-lidar-au-service-de-l-archeologie/>

<http://www.searchmesh.net/>

<http://brest3d.free.fr>

**Ville de Toul :**

<http://www.toul.fr/>

**Musée des plans-reliefs :**

[www.museedesplansreliefs.culture.fr/](http://www.museedesplansreliefs.culture.fr/)

**Rhinocéros 3D, Grasshopper :**

[www.rhino3d.com/](http://www.rhino3d.com/)

[www.grasshopper3d.com/](http://www.grasshopper3d.com/)

**Autodesk ( 3DS, Maya ) :**

<http://www.autodesk.fr/>

**Numérisation du patrimoine :**

<http://www.culture.gouv.fr/culture/mrt/numerisation/>

**Plan-relief de Prague :**

<http://www.langweil.cz/>

**Projet Rome Reborn :**

<http://www.romereborn.virginia.edu/>

## 9. Table des figures

Figure 1 : Photographie du Plan relief de Toul.....	p6
Figure 2 : Nuage de point issu de la numérisation du plan relief.....	p7
Figure 3 : Maquette 3D des fortifications de Toul.....	p8
Figure 4 : Photographie du plan relief de Prague.....	p9
Figure 4 : Acquisition de point par photogrammétrie.....	p9
Figure 5 : Projet <i>Rome Reborn, temple vespalien</i> .....	p10
Figure 5 : Projet <i>Rome Reborn</i> , Nuage de point issu de la numérisation de la maquette.....	p10
Figure 6 : Etude des ordres classiques.....	p11
Figure 6 : modèle paramétrique des ordres classiques.....	p11
Figure 7 : Restitution des fortifications de Brest.....	p12
Figure 8 : Restitution des fortifications de Carcassonne.....	p12
Figure 9 : Confrontation de la maquette 3D au maillage issu du scan du plan-relief.....	p14
Figure 10 : interface de Grasshopper.....	p15
Figure 11 : définition d'un front bastionné.....	p16
Figure 12 : Schéma daté des différents fronts bastionnés de Toul.....	p17
Figure 13 : Méthode de construction des tenailles.....	p18
Figure 13 : coupe sur une tenaille.....	p18
Figure 14 : maquette numérique des différentes tenailles.....	p19
Figure 15 : Construction de la tenaille de Toul.....	p20
Figure 16 : maquette du front bastionné comprenant la tenaille.....	p20
Figure 17 : Méthode de construction de la demi-lune.....	p21
Figure 18 : variante de la demi-lune.....	p21
Figure 19 : Modélisation d'une demi-lune à Flanc .....	p22
Figure 20 : maquette de la demi-lune 49.....	p23
Figure 21 : Construction de la contre garde.....	p24
Figure 22 : maquette de la contre garde.....	p24

Figure 23 : Modélisation sur Maya de la contre-garde et de la demi-lune 48.....	p25
Figure 24 : construction de la cunette.....	p26
Figure 25 : Construction des talus et des traverses.....	p27
Figure 26 : maquette des talus et des traverses.....	p27
Figure 27 : coupe et maquette d'un talus positionné sur un autre élément.....	p28
Figure 28 : maquette d'un front bastionné comprenant des talus.....	p28
Figure 29 : construction des places d'arme et du chemin couvert.....	p29
Figure 30 : maquette d'un front bastionné avec place d'arme et chemin couvert.....	p30
Figure 31 : Comparaison de différents types de place d'arme.....	p31
Figure 32: Principe de la modélisation front par front.....	p32
Figure 33 : maquette d'un front bastionné.....	p33
Figure 34 : assemblage de différents fronts bastionnés sur grasshopper.....	p33
Figure 35 : ouvrage à corne de Metz.....	p34
Figure 36 : décomposition d'un ouvrage à corne.....	p34
Figure 37 : principe de la coupe.....	p35
Figure 38 : coupes à différentes échelles .....	p35
Figure 39 : les fortification de Toul aujourd'hui.....	p37
Figure 40 : détail sur le plan relief de Toul.....	p37
Figure 41 : détail sur le plan relief de Toul.....	p38
Figure 42 : les limites de la méthode.....	p38
Figure 43 : vue aérienne de briançon et tables du plan-relief de briançon.....	p40