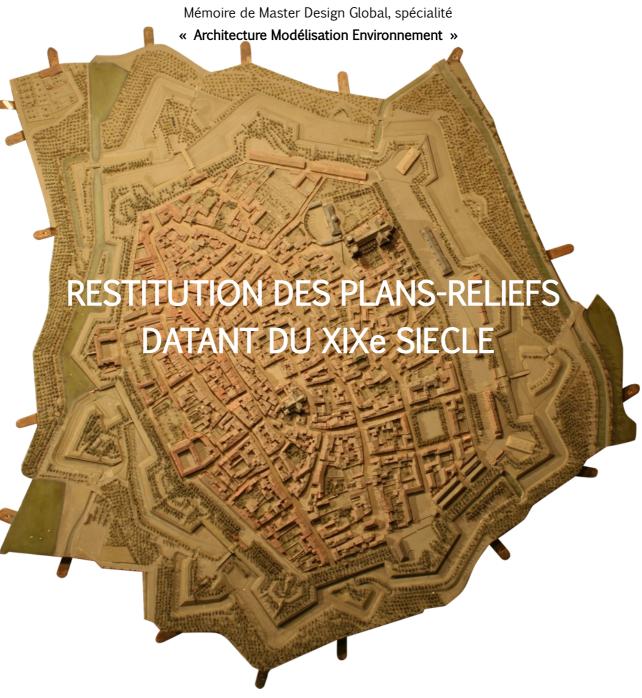
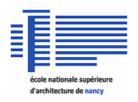
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy Université Henry Poincaré (Nancy 1) Institut National Polytechnique de Lorraine

-







K. JACQUOT

Laboratoire d'accueil : CRAI

Sous la direction de : C.CHEVRIER

SEPTEMBRE 2010

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	4
	1.1 Contexte	4
	1.2 La collection	4
	1.3 Le plan-relief de Toul	ε
	1.4 La numérisation de plan-relief	
2.	PROBLÉMATIQUE	8
	2.1 Enjeux	8
	2.2 Modèle tel que construit	8
	2.3 Mon travail	9
3.	APPROCHES EXISTANTES	11
	3.1 Outils et techniques pour l'acquisition	
	3.1.1 L'acquisition par lasergrammétrie	
	3.1.2 L'acquisition par photogrammétrie	
	3.2 Outils et techniques pour la modélisation	
	3.2.1 Modélisation paramétrique	
	3.2.2 Modélisation procédurale	
	3.3 Réalisations semblables	
	3.3.1 Prague	
	3.3.2 Pékin	
	3.3.4 Conclusion	
	3.4 Tests d'outils d'acquisition	17
	3.4.2 Conclusion	
	3.4.2 COTICIUSIOII	22
4.	PRINCIPE DE LA METHODE	23
5.	ACQUISITION	26
	5.1 Le terrain	26
	5.2 Les bâtiments	26

6. RESTITUTION	29
6.1 Le terrain	29
6.2 Les bâtiments	30
6.2.1 Positionnent	
6.2.2 Fractionnement	33
6.2.3 Identification	34
6.2.4 Correction et reconstruction automatique	42
6.3 Paramètres et ajustements	
6.3.1 Interface pour les ultimes ajustements manuels	
6.3.2 Objets paramétrés	
6.3.2.1 Fenêtres et autres objets présents sur les façades	
6.3.2.2 Cheminées	
6.3.2.3 Murets	
6.3.2.4 Végétation	52
9. TESTS DU LOGICIEL	55
9.1 Limites	55
9.2 Cas non développés	58
10. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	59
10-1 Conclusion	59
10-2 Perspectives	
12. LEXIQUE	62
13. BIBLIOGRAPHIE	64
14. TABLES DES FIGURES	67

1. INTRODUCTION

Le FRE-CRAI, laboratoire où s'est déroulé ce travail de recherche sur la restitution du plan-relief de Toul, effectue des recherches sur la conception assistée par ordinateur et la modélisation de la morphologie architecturale et urbaine. La représentation par image de synthèse, la mesure optique et les problématiques patrimoniales complètent les activités du laboratoire.

L'axe de recherche Simulation et Visualisation pour l'Architecture cherche à améliorer les outils et les méthodes d'acquisition existants pour répondre aux besoins des architectes, urbanistes et des archéologues. Outre l'acquisition, la restitution est l'autre maillon dans le processus de simulation et de visualisation. L'étude présentée dans ce rapport se situe à la rencontre de ces champs d'étude.

Pour répondre aux besoins propres de la modélisation de plans-reliefs, de nombreux outils sont à notre disposition : des techniques basées sur l'image (*ImageModeler* ou *PhotoModeler*) aux techniques basées sur les relevés lasers (*Handyscan*, etc.) en passant bien sûr par les classiques outils de CAO (*AutoCAD*, *Maya*, etc.). Combiner ces techniques là où elles sont les plus pertinentes est la pierre angulaire de ce travail car une technique seule ne permet pas de répondre aux enjeux énoncés dans le chapitre 2.1. La photogrammétrie se prête peu à l'acquisition de formes irrégulières, drapées, sculptées ou dans notre cas du « *modelé du terrain* » tandis que la lasergrammétrie reste encore une option peu pertinente quant à la numérisation de surfaces planes aux angles vifs comme des toits.

1.1 Contexte

Initié par le Ministère de la Culture et de la Communication, le programme national de numérisation du patrimoine culturel répond à deux objectifs. D'une part, il améliore indirectement la conservation du patrimoine en limitant la dégradation provoquée par un trop grand nombre de communications. D'autre part, ce programme est également un moyen de valorisation et de diffusion pour atteindre un plus large public, à la fois à l'échelle nationale mais aussi à l'étranger en proposant des ressources pour l'éducation, la recherche et le tourisme culturel.

1.2 La collection

Issue d'une tradition de plus de 500 ans, les plans-reliefs furent réalisés afin de permettre aux armées de visualiser aussi bien des sites fortifiés en projet, en cours d'aménagement, réalisés et même des places-fortes assiégées et nouvellement conquises. De nos jours, ils offrent une documentation unique sur l'histoire des villes, de l'aménagement des campagnes, de la fortification et de l'architecture en Europe depuis le XVII^e siècle lorsque Louis XIV commanda à Vauban la réalisation du plan-relief de Dunkerque.

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 épargné. Les bâtiments sont constitués de blocs de tilleuls taillés 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 rendue 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. » (www.museedesplansreliefs.culture.fr).



Illustration 1: Le plan-relief de la Citadelle de Briançon

Conservées depuis 1777 dans les combles de l'hôtel des Invalides à Paris, les maquettes furent laissées sans protection contre la poussière, la lumière et l'humidité. Déjà endommagés lors de leur déménagement du Louvre pour les Invalides, les plans-reliefs connaissent depuis 1994 une opération de restauration où 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 sur plus d'une centaine ont bénéficié de ce traitement pérennisé par leur placement dans une vitrine climatisée avec un éclairage contrôlé. Le plan-relief de Toul n'a pas encore bénéficié de ces opérations de restauration.

1.3 Le plan-relief de Toul

Réalisés seulement quelques décennies avant l'abandon des fortifications bastionnées, le plan-relief de Toul est un des derniers héritiers de cette tradition initiée sous Louis XIV. Réalisé entre 1846 et 1861, ce plan-relief mesure 39m^2 ce qui le classe parmi les maquettes de grandes tailles de la collection. Il est composé de vingt tables pouvant être séparées dont la plus grande – celle de la ville - mesure $2,31 \times 2,23 \text{ m}$. Les autres tables regroupent la campagne environnante. Outre la table de la ville, c'est une table de $1,50 \times 2,50$ représentant la campagne qui doit être numérisée. Ilots et façades sont documentés dans les cahiers de développement où on retrouve plans et élévations dessinés à la même échelle que la maquette, c'est-à-dire au 1/600.



Illustration 2: Une partie représentative du plan-relief de Toul

1.4 La numérisation de plan-relief

Le projet de numérisation 3D du plan-relief de Toul et des documents graphiques s'y rapportant s'inscrit dans la logique du programme national de numérisation décrit plus tôt. Le Musée des Plans-Reliefs souhaite ainsi valoriser ses collections largement méconnues, sous-exploitées et fragiles en les rendant consultables sur internet et sur des bornes interactives de manière à ce que la maquette devienne le support documentaire à travers lequel seraient accessibles d'autres documents relatifs à la maquette et à la ville de Toul (cahiers de développement, cadastre, études de l'Inventaire etc.).

Le projet auquel sont associés le Musée des Plans-Reliefs, le CRAI et le Services régional de l'Inventaire de Lorraine est un projet sur une seule année au cours de laquelle doivent être expérimentés, sur une partie de la maquette, différents procédés d'acquisition et de modélisation dans le but de généraliser une seule méthode au reste du plan-relief et à terme, à l'ensemble du fond muséal.



Illustration 3: Une collection importante, sous-exploitée et fragile. (www.museedesplansreliefs.culture.fr)

Malgré un délai assez court, les phases de recherches sur la numérisation, sur les outils et techniques à utiliser pour parvenir à créer un modèle tridimensionnel fidèle au plan-relief constitue une étape majeure qui est déterminante puisque les plans-reliefs présentent un certain nombre de caractéristiques uniques qui vont influencer les choix en terme d'acquisition puis de restitution. Nous allons donc nous attarder sur ces points dans les parties suivantes.

Tout d'abord, dans le prochain chapitre, nous aborderons les premiers questionnements soulevés par l'objet à numériser puis, dans le chapitre 3 (Approches existantes), nous analyserons les techniques actuelles au regard de notre projet et notamment les pratiques mises en œuvre dans des programmes de numérisation similaires afin de déterminer notre propre méthode.

2. PROBLÉMATIQUE

Nous allons évoquer dans cette partie les enjeux soulevés par la modélisation du plan-relief de Toul, un objet dont les caractéristiques nous obligent à adapter les techniques courantes de numérisation.

2.1 Enjeux

L'expérimentation porte sur deux éléments. Il s'agit de la table de campagne $(1,50 \times 2,56 \text{ m})$, pour l'acquisition des zones non bâties et la restitution des éléments de végétation, et du quartier de la rue de la Croix-de-Füe $(2,23 \times 2,13 \text{ m})$ qui sert de zone de test pour la partie la plus problématique, c'est-à-dire la table de ville et les fortifications. En comparaison à un même travail portant sur une ville réelle, la maquette présente des contraintes qui lui sont propres, liées à ses dimensions, son échelle et à son âge :

- La taille des constructions est très petite. Au 1/600, les maisons ne dépassent pas les trois centimètres de haut, les rues ne mesurent pas plus d'un centimètre de large et certaines venelles ne sont que d'étroits espaces de quelques millimètres. L'échelle pose également une autre question. Au 1/600, de nombreux espaces ou objets sont peu visibles alors que sur un modèle 3D, maquette virtuelle sans échelle dans laquelle l'utilisateur peut se promener au niveau des rues, le moindre détail ou défaut ne passe pas inaperçu.
- Très peu de masques sont présents sur la maquette ; pas d'arbres, de voitures ni de mobiliers urbains.
- La densité des constructions et la taille de la maquette, font que certaines zones ne sont pas accessibles et sont donc peu documentées. Les cours du centre ville figurent parmi les objets difficilement photographiables.
- La numérisation doit se faire sans contact avec le plan-relief.
- L'état de conservation est mauvais. Nous traitons ce point plus en détail dans le chapitre suivant.

2.2 Modèle tel que construit

La volonté du Musée des plans-reliefs est de disposer d'un double numérique parfait du plan-relief de la ville de Toul. Or, il est inimaginable de modéliser la maquette dans son état actuel du fait des effets du temps et donc des altérations qu'elle a subie et qui, pour certaines, vont disparaître lors d'une restauration imminente. Outre la poussière qui dénature les couleurs du plan-relief, de nombreuses textures se sont décollées, des éléments sont manquants (cheminées, fenêtres, etc.), la colle a coulé et a pris une teinte noire et beaucoup de surfaces ne sont plus planes du fait de l'humidité.

Ainsi, créer un modèle tel qu'existant est impossible. Rendre toutes les altérations que la maquette a pu subir ne pouvait être envisagé avec les mêmes outils que ceux utilisés pour la restitution de la géométrie générale des bâtiments. Il nous fallait gommer les effets du temps autant que possible. Le choix a été fait de modéliser tel que construit : on s'efforce de retrouver un état originel plausible de l'élément relevé [FUC06].







Illustration 4: décollements, coulures, poussière : un échantillon des altérations subies par la maquette.

L'échelle de l'objet à numériser et son état de conservation vont nous permettre de prendre position sur les choix à faire quant aux outils d'acquisition qui vont être présentés dans le chapitre suivant. En analysant les techniques actuelles au vue de notre projet – une maquette du XVIII^e siècle - et notamment les pratiques mises en œuvre dans des programmes de numérisation similaires, nous pouvons déterminer notre propre méthode.

2.3 Mon travail

Ce mémoire présente l'ensemble du projet de restitution du plan-relief de Toul sans se restreindre à ma seule participation. La raison principale est la relation qu'il peut y avoir entre, par exemple, la réflexion sur une méthode, son implémentation et son utilisation, autant d'étapes ne pouvant être réalisée par une seule personne (faute de temps ou de compétences) mais étroitement liées. C'est pour cela qu'il me semble justifié de présenter les différents aspects du projet.

Les projets présentés dans le chapitre 3.3 montreront que la restitution tridimensionnelle de maquettes est une entreprise faisant appel à de nombreuses compétences puisque ce sont des équipes aux effectifs conséquents qui s'attèlent à la numérisation des maquettes de Prague et de Rome. La restitution du plan-relief de Toul est aussi le fruit d'un travail collectif mais avec un groupe beaucoup plus restreint (dix personnes) constitué en partie de stagiaires dont les périodes d'activité allaitent de trois à cinq mois. Ma participation à ce projet porte sur plusieurs éléments.

Il y a tout d'abord les phases d'analyses. La définition de la problématique et notamment des enjeux liés à l'état et à l'échelle de la maquette, ont permis de guider la réflexion sur les outils et techniques pour l'acquisition et la modélisation. L'analyse se poursuit par l'étude de projets similaires et l'expérimentation d'outils adaptés à la restitution de plans-reliefs dans le but d'affiner la méthode initiale (déterminer une typologie des bâtiments, murets et végétation qui composent ce plan-relief afin d'utiliser cette classification géométrique pour la reconstruction paramétrique des objets et d'établir les paramètres pour chaque catégorie identifiée). Cette réflexion sur les approches existantes (chapitre 3) permet d'enrichir la réflexion menée collectivement sur la méthode présentée dans le chapitre 4. Enfin, dans cette phase d'analyse, la détermination des composants caractéristiques des objets à reconstruire (fenêtres, bandeaux, cheminées, murets, végétation, etc.) est menée afin de définir leurs paramètres et les conditions nécessaires à leur mise en place.

L'étape d'acquisition est l'autre activité à laquelle j'ai pu participer. L'acquisition par capteur laser et

par photogrammétrie est décrite dans le chapitre 5. De nombreuses campagnes de numérisation par capteur laser et de prises de vue ont eu lieu tout au long du premier semestre 2010 afin de combler les manques d'information au fur et à mesure qu'ils apparaissaient. Les photographies sont ensuite utilisées dans *PhotoModeler Scanner*, logiciel de photogrammétrie nous permettant d'acquérir les données essentielles à la reconstruction tridimensionnelle. Cette étape d'acquisition que j'ai menée sur chacune des deux tables s'est étalée sur plusieurs semaines.

L'implémentation, à laquelle je n'ai pas pris part, laisse place à l'étape d'utilisation et de test. Décrite dans le chapitre 6.3, elle réside dans la mise en place des objets paramétrés mais aussi dans les ajustements manuels des géométries mal reconstruites dans les phases automatiques.

3. APPROCHES EXISTANTES.

Dans la chaîne de numérisation, l'étape la plus importante est l'acquisition puisque c'est d'elle que va dépendre le reste du processus de restitution. Les travaux de numérisation de plans-reliefs et de maquettes qui vont être présentés viennent affirmer ce constat tant la question de l'acquisition prévaut. En matière d'acquisition, deux grandes familles sont identifiées, les techniques basées sur la lasergrammétrie et celles basées sur la photogrammétrie, chacune d'elle avec ses atouts et ses défauts. Ce n'est qu'en analysant les différences et les choix faits dans des projets similaires et au regard des outils à notre disposition qu'il est possible d'établir notre propre méthode de restitution du plan-relief de Toul.

3.1 Outils et techniques pour l'acquisition

Parmi les techniques d'acquisition tridimensionnelle appliquées à l'architecture, deux techniques nous intéressent plus particulièrement. La première est basée sur la numérisation active sans contact, comme les capteurs laser, qui émettent un rayonnement dont la position ou la réflexion permet de déterminer des coordonnées xyz. La seconde fonctionne de manière passive à partir de principes photogrammétriques. Il existe d'autres techniques d'acquisition comme celles basées sur l'effet de moiré où on observe comment se déforment des franges de lumière sur l'objet étudié (projection de lumière structurée), mais leurs limites d'application dans le domaine architectural font que nous les aborderons pas [CHA00], [GAV98], [FUC06].

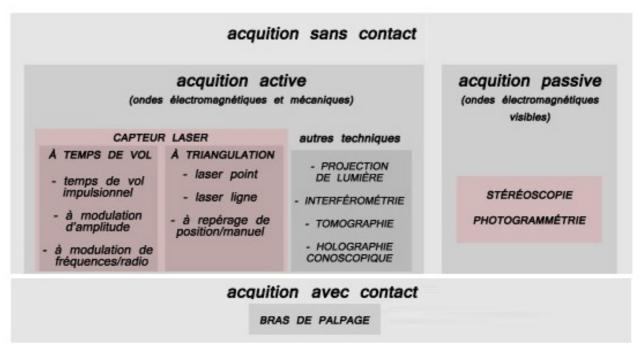


Illustration 5: Tableau non exhaustif des techniques d'acquisition 3D

3.1.1 L'acquisition par lasergrammétrie.

En matière d'acquisition laser pour l'architecture, deux techniques complémentaires coexistent : la numérisation laser à temps de vol (ou télémétrie laser) et l'acquisition par triangulation. De nombreuses recherches rappellent que le choix d'une de ces deux techniques dépend des caractéristiques de l'objet étudié. Les capteurs à temps de vol sont tout désignés pour les objets de dimensions importantes car ils permettent 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 faibles dimensions [FUC06], [GUI05].

Cela s'explique simplement par le fonctionnement des capteurs. Un capteur à temps de vol calcule la distance parcourue par la lumière pendant le temps nécessaire pour effectuer l'aller-retour capteur-objet-capteur. L'imprécision de cette méthode 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 $3x10^{10}$ cm/s, effectuer des mesures des distances relativement faibles nécessite une grande précision de l'appareil de mesure. La numérisation par triangulation ne dépend pas d'un calcul où la vitesse de la lumière intervient puisqu'elle repose sur l'observation par un système optique décalé d'un point émis par un 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.

Il existe une ambiguïté pour l'acquisition laser de maquettes ou de plans-reliefs puisque ce sont des objets de grandes dimensions mais riches en détails. La maquette que nous étudions est composée de différentes tables permettant un accès plus facile aux différentes parties du plan-relief à la différence d'autres maquettes (chapitre 3.3). Ce même besoin d'accessibilité fait que la mobilité de l'appareil utilisé est un enjeu important. Parmi les capteurs à triangulation, les capteurs à repérage de positions offrent la meilleure maniabilité par rapport aux capteurs à triangulation laser ligne ou laser point.

Aussi bien pour les capteurs à triangulation que pour les capteurs à temps de vol, il existe quatre grands problèmes d'acquisition [FUC06] lorsque :

- les surfaces sont rugueuses. Les irrégularités de la surface numérisée engendrent des variations dans les temps de retour du laser. Dans ce cas, 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).
- la surface est réfléchissante. La réflexion spéculaire a lieu sur des surfaces ne présentant aucun défaut supérieur aux valeurs de la longueur d'onde du laser, c'est-à-dire à 0,6 mm.
- la réflectivité ou l'albédo de surface. Des surfaces dont les albédos diffèrent peuvent générer une variation de réflectivité qui va être source d'erreurs de mesure.
- la surface présente des discontinuités et des occlusions. A la limite d'objet ou en présence de trous dans celui-ci, le faisceau peut ne pas être totalement réfléchi.

3.1.2 L'acquisition par photogrammétrie.

La photogrammétrie est une technique apparue à la fin du XIX^e siècle mais aux origines théoriques beaucoup plus anciennes et qui permet d'effectuer des mesures sur des scènes du réel à partir de photographies. Sous le terme de photogrammétrie, on retrouve de nombreuses techniques [ALB06] comme la stéréophotographie numérique ou la photogrammétrie numérique multi-images, toutes deux issues de l'évolution de techniques plus anciennes.

La stéréophotogrammétrie est un procédé qui utilise la stéréoscopie pour effectuer des mesures sur deux clichés dont les position de prise de vue sont légèrement décalées. Ces deux clichés forment un couple stéréoscopique. C'est la zone de chevauchement de ces deux vues qui met à profit la capacité du cerveau humain à reconstituer une vision en relief.

La photogrammétrie multi-images est une alternative à la stéréophotogrammétrie. Contrairement au cas précédent, les points de vue des images sont aléatoires. Le résultat obtenu est un bloc d'images où la position relative de chaque image est déterminée par la voisine grâce à l'ajustement des faisceaux respectifs de chaque prise de vue.

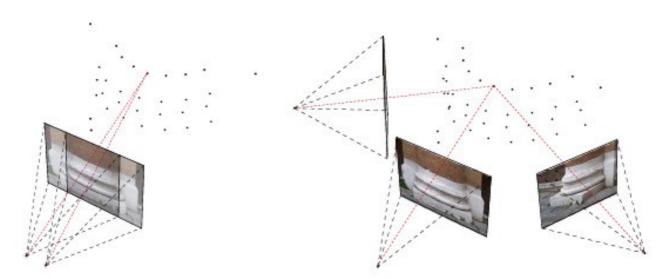


Illustration 6: Principe de la restitution à partir d'un couple d'images et d'un bloc multi-images [LUC06]

Dans le deux techniques, chaque point visible sur plusieurs images peut être déterminé en trois dimensions. C'est une méthode abordable et souple puisque les clichés d'un même projet peuvent être pris avec des appareils grands publics. Les atouts de la photogrammétrie sont nombreux, nous retiendrons évidemment qu'elle est très utile dans les espaces peu accessibles où la portée d'un capteur 3D peut nous faire défaut.

3.2 Outils et techniques pour la modélisation.

Dans cette partie, nous allons détailler deux techniques de modélisation innovantes dans le domaine de la création de modèles riches, vastes et dans des laps de temps réduits.

3.2.1 Modélisation paramétrique.

La modélisation paramétrique est un outil qu'on peut rencontrer dans des logiciels comme *Maya*, *3DS* ou même *Autocad* puisqu'il nous est donné la possibilité de paramétrer les éléments d'une bibliothèque constituée de primitives géométriques telles que des cubes, sphères, tores, etc. [CHE09a]. Des bibliothèques spécialisées existent dans des domaines divers (mécaniques, structure acier, etc.), aucune en architecture. Au sein d'équipes de recherche, il existe des outils de modélisation paramétrique s'appuyant sur les règles architecturales des ordres classiques [FUC06] lci, la primitive n'est plus le cube ou le cylindre, mais la moulure [LUC09].

La modélisation paramétrique consiste d'abord à étudier de manière théorique les éléments architecturaux (voûtes, fenêtres, colonnes, etc.). Chacun de ces éléments est défini par des composants primitifs pouvant être paramétrés et hiérarchisés (la variation de ces paramètres permet la génération de tout un ensemble de variantes conférant à la modélisation paramétrique une valeur exploratoire et heuristique pour la conception architecturale). La modification de la valeur d'une primitive se répercutera sur les nœuds supérieurs de la hiérarchie ce qui a pour conséquence de modifier l'ensemble du modèle 3D.

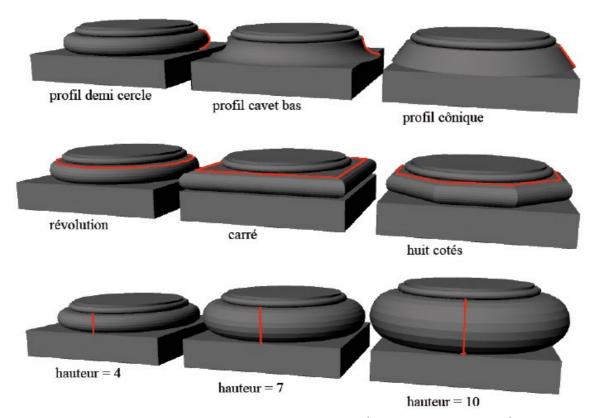


Illustration 7: Variation des paramètres de la moulure (profil, forme et hauteur) [CHE09b]

3.2.2 Modélisation procédurale.

Abordée dans le chapitre suivant dans le cadre de l'analyse des méthodes utilisées pour la restitution de la maquette de Rome, la modélisation procédurale est un terme qui recouvre plusieurs concepts et qui se confond souvent avec la modélisation paramétrique. Le sens général qui en ressort est que l'objectif de ce type de modélisation est la création de modèles tridimensionnels ou de textures à partir de règles. L'ensemble de ces règles peut-être configurable grâce à des paramètres. Les grammaires formelles comme les L-systèmes (ou *CGA shape* pour *CityEngine*) sont aux fondements de la modélisation procédurale puisqu'elles permettent de manière algorithmique de produire par itération de vastes scènes dans lesquelles sont déclinés en instances un ou plusieurs objets [PER06], [MUL06]. Bien que basée sur la modélisation paramétrique, les objets créés par modélisation procédurale tendent à répondre à des exigences différentes.

La modélisation procédurale peut être le moyen optimal pour générer de vastes scènes de manière économique (temps et moyens). En jouant sur les paramètres des règles, elle cherche à décliner un maximum d'instances. La réalité historique n'est pas recherchée puisqu'on vise davantage à créer des environnements plausibles. C'est pour cela que la modélisation procédurale est largement utilisée dans le domaine du jeu vidéo et du cinéma.

3.3 Réalisations semblables

3.3.1 Prague

Réalisée entre 1826 et 1837, la maquette de Prague d'Antonin Langweil est deux fois plus petite que celle de Toul. Elle est constituée de 52 tables dont la plus grande mesure 1,60 x 1,00 m ce qui rend l'accès aux différents éléments de la maquette plus aisé. En meilleur état, le plan-relief de Prague est mieux préservé, ses textures sont certes plus riches et en plus grand nombre mais la volumétrie est généralement simplifiée (les fenêtres sont peintes en trompe-l'œil). Pourtant, c'est une entreprise de près de 200 professionnels en robotique, modélisation, programmation et photographie armée de moyens lourds (boroscope, robot) et d'un partenariat avec *Autodesk* qui s'est attelée à la numérisation de ce plan-relief réalisé au 1/480.

Le logiciel d'*Autodesk ImageModeler* a été modifié pour répondre aux besoins spécifiques de la maquette de Prague en matière de numérisation des bâtiments. Alors que le sol est généré grâce aux nuages de points issus de traitements photogrammétriques [SED09], les bâtiments sont restitués à partir de points acquis manuellement.



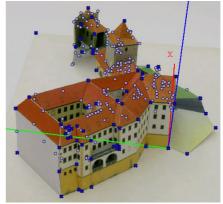


Illustration 8: Trompe l'œil sur le plan-relief de Prague et acquisition manuelle de points caractéristiques (www.langweil.cz)

3.3.2 Pékin

Il existe d'autres projets de numérisation de maquettes anciennes tels que l'expérimentation réalisée sur une maquette de Pékin datant des années 50. La reconstruction tridimensionnelle de la maquette de Pékin (75m², éch. : 1/1000) est basée sur l'emploi conjoint d'un capteur à lumière structurée (chapitre 3.1) et d'algorithmes de détection de contours sur des couples photographiques stéréoscopiques. Des points caractéristiques de segments sont extraits par stéréophotogrammétrie puis traduits dans le système de coordonnées du nuage de points créé par le capteur. Le résultat est un nuage de points dans lequel les arêtes sont mieux restituées. Néanmoins, la reconstruction automatique à partir des points des arêtes n'est pas encore réalisée [ZHU09].

3.3.3 Rome

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 ap. J.C.. A partir de la maquette de Rome connue sous le nom de *Plastico di Roma anti-ca*, achevée dans les années 70 par Italo Gismondi, les opérations de numérisation furent conduites uniquement au moyen de capteurs tridimensionnels. Ni les capteurs à triangulation, ni les capteurs à temps de vol ne furent envisagés puisque l'objet à numériser est à la fois de grandes dimensions tout en maintenant un niveau de détail important (chap. 3.1.1). L'outil sélectionné est un capteur radar de Leica et un capteur à triangulation pour l'acquisition des objets les plus petits [GUI05].

Il faut préciser que les données acquises lors de la numérisation par capteur ont une utilisation limitée dans le modèle restitué. 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 *3DS* ou *Multigen Creator*, les 95% restants, des bâtiments anonymes dont l'architecture et la position sont moins bien connues, sont recréés grâce à *CityEngine*, un outil de modélisation procédurale (chapitre 3.2.2). 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. Grâce à la variation de paramètres pour la reconstruction des bâtiments il est possible de reconstruire un vaste environnement urbain plausible. Les résultats sont, certes, réalistes mais la question de la fidélité historique reste en suspens [DYL09].

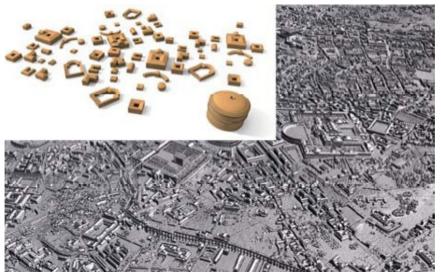


Illustration 9: Le maillage corrigé issu de la numérisation laser et différents types de volumes utilisé sur CityEngine [GUI05].

Notons enfin qu'un second projet de numérisation de maquette de la Rome Antique existe. Mené par l'université de Caen sur la base de la maquette de l'architecte et grand prix de Rome 1900 Paul Bigot, ce projet est de moindre envergure du fait des dimensions de la maquette (70m², éch.: 1/450) et des méthodes employées pour la restitution tridimensionnelle, une modélisation menée de manière classique sur le logiciel 3DS.

3.3.4 Conclusion

Les exemples présentés précédemment mettent en avant le problème de l'acquisition puisqu'aucun outil ne peut accomplir seul l'acquisition des données essentielles à une restitution tridimensionnelle (voir illustration 10). Ces différents cas nous permettent déjà d'affiner les choix qui nous sont possibles en terme de capteurs 3D. Comme le met en avant le projet mené sur la maquette de Rome, les dimensions d'un plan-relief requièrent une approche typique des grosses structures où les capteurs à temps de vol sont pertinents. Néanmoins, malgré le choix fait d'utiliser un capteur radar, capable de numériser aussi bien de gros objets que des éléments plus petits qu'un capteur à temps de vol classique ne saurait acquérir, un capteur à triangulation a tout de même été nécessaire pour le projet *Rome Reborn*.

Villes Infos.	Prague	Pekin F	Rome (Italo Gismondi)	Toul
date de réalisation	1826	1950	1970	1846
état de conservation	bon	bon	bon	mauvais
échelle	1/480	1/1000	1/250	1/600
surface (m²)	20	75	278,4	39
nombre de tables	52	94	/	20
surface par table (m²/table)	0,38	0,8	/	1,95
effectif approximatif	200	n.a.	80	10
Acquisition	stéréoscopie	capteur à lumière structurée la et stéréoscopie	aser radar et capteur par triangulation	capteur par triangulation et photogrammétrie

Illustration 10: tableau comparatif de différents projet de numérisation de maquettes

3.4 Tests d'outils d'acquisition

Après avoir eu un aperçu des outils entrant en jeu pour l'acquisition tridimensionnelle et de différents projets de numérisation, il est nécessaire de rappeler les résultats de tests réalisés (chapitre 3.4) avant l'acquisition définitive et qui sont déterminants dans le choix de la méthode employée pour la restitution du plan-relief (chapitre 4). Comme nous l'avons vu dans le second chapitre, le fait de créer un modèle tridimensionnel à partir d'un plan-relief engendre des contraintes qui sont propres à cet objet ce qui nécessite d'adapter les outils et les techniques (chapitre 3.4.1) utilisées habituellement. Du fait du peu de fiabilité des ressources documentaires à notre disposition, la reconstruction s'opère uniquement d'après la maquette.

3.4.1 Limites matérielles et logicielles

Deux séries de relevés laser ont été effectuées par *Handyscan*. En février, une partie de la ville et la table de campagne ont été relevées à une précision de 2mm ce qui nous a permis de nous rendre compte des nombreuses difficultés. D'une part, les arêtes sont très adoucies et les surfaces ont un aspect granuleux et d'autre part, de nombreux objets nous restent inaccessibles tels que les rues étroites, venelles et pieds de bâtiments.

En mai et juin, une seconde campagne de relevés fut entreprise avec des numérisations à 0,5mm et à 0,3mm. Les nuages de points sont beaucoup plus denses et satisfaisants dans les deux cas. Deux arguments nous ont fait choisir la résolution à 0,5mm. Le temps d'acquisition d'abord. Compter une demi-heure à trois quarts d'heure pour numériser un volume de $13 \, \mathrm{cm}^3$ où apparaissent des bâtiments. Cette boîte de $13 \, \mathrm{cm}$ de côté est l'autre point décisif dans le choix car à une résolution de 0,3mm la boîte est plus petite ce qui augmente le temps d'acquisition.

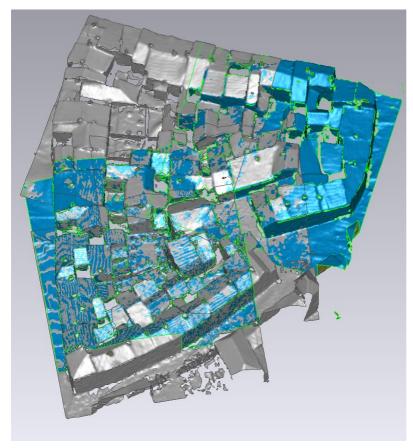


Illustration 11: Les différentes parties assemblées de l'îlot 23 (Geomagic)

En parallèle des tests sur *Handyscan*, trois logiciels de photogrammétrie ont été testés avant que *PhotoModeler* ne soit choisit. Nous allons énoncer en quelques points les raisons de ce choix qui se base sur l'utilisation précise du projet de numérisation de la maquette. La comparaison s'est donc limitée aux outils nécessaires à la récupération des éléments géométriques caractéristiques de la maquette, l'acquisition des textures n'est donc pas traitée.

La photogrammétrie, comme le relevé laser, permet d'éviter tout contact avec l'objet étudié et donc de limiter les risques de dégradations provoquées par notre intervention ce qui constitue un enjeu majeur face aux caractéristiques de la maquette. Néanmoins, l'ajout de cibles de référencement sur le modèle facilite et améliore l'orientation des photographies.

Une première série de photographies réalisée en février fut employée dans le cadre d'une reconstruction stéréophotographique sur *PhotoModeler Scanner* (PMS). Les clichés doivent avoir suffisamment de surface en commun pour devenir des couples stéréoscopiques. La présence d'une trappe à plus de quatre mètres au dessus de la maquette nous a permis de réaliser des vues aériennes mais les limites matérielles et l'éloignement imposé par la position de la trappe jouèrent sur le niveau de précision de la restitution sur PMS.

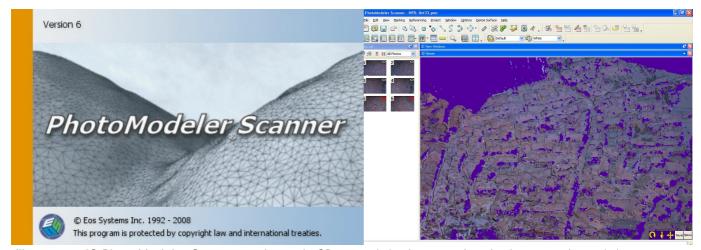


Illustration 12: PhotoModeler Scanner et le rendu 3D par stéréophotographie de deux couples stéréoscopiques.

PhotoModeler Scanner est un logiciel utilisant une technique de numérisation 3D d'après photographies. En utilisant les principes de la stéréophotogrammétrie, il permet de facilement calibrer les appareils photographiques pour obtenir leurs positions et leurs orientations. Une fois la calibration réussie, des couples stéréoscopiques sont formés et permettent d'obtenir un nuage de points similaire à celui créé par lasergrammétrie. Des traitements intégrés au logiciel permettent de créer un maillage à partir du nuage de points. En conséquence, le modèle créé est lourd, sans sémantique et ne correspond – tel qu'il est – à aucune réalité physique – tel qu'un îlot par exemple – puisque les limites du modèle sont celles du recouvrement du couple stéréoscopique. Enfin, à la différence de la photogrammétrie classique, le positionnement de cibles n'est pas essentiel ce qui permet d'éviter tous contacts avec l'objet étudié.

Outre la nécessité de prendre des photographies avec un recouvrement important (seule la zone apparaissant sur les deux clichés apparaît en relief), la qualité des prises de vue est déterminante car l'outil *Dense Surface Modeling* de PMS ne fonctionne de manière optimale qu'avec des objets aux textures contrastées [ALB09]. D'un point de vue mathématique, le logiciel utilise les similarités des images pour déterminer les pixels correspondants sur les couples et par triangulation, déterminer les coordonnées xyz. Sur une maquette poussiéreuse et sans éclairage adéquat, les résultats sont loin d'être probants.

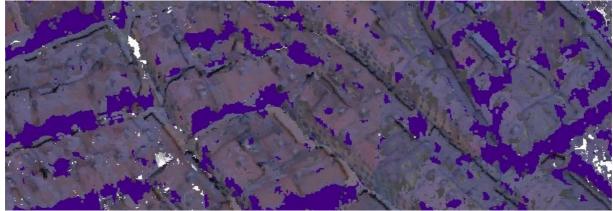
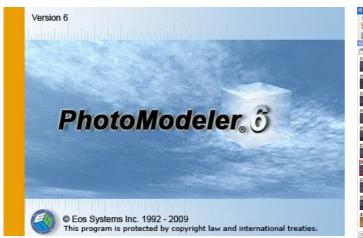


Illustration 13: Détail du nuage de points sur une partie de la ville (PMS)



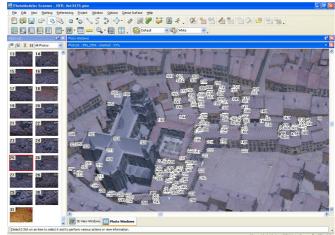


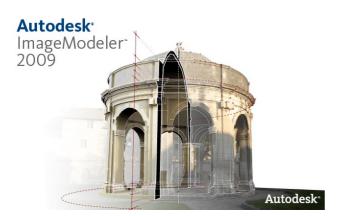
Illustration 14: Arêtes des toitures retrouvées sur PhotoModeler.

PhotoModeler est un logiciel de photogrammétrie multi-images. A partir d'une série de photographies réalisées à l'aide d'un appareil numérique dont on a obtenu les données de calibration (les déformations optiques ayant un impact sur les images saisies), on peut obtenir la position relative des différents clichés et leurs orientations. Quelques points seulement placés sur un minimum de deux photographies suffisent ensuite à orienter les clichés.

PhotoModeler repose davantage sur des opérations manuelles, on a un meilleur contrôle sur l'ensemble de la chaîne d'acquisition. La précision du placement de ces points peut être contrôlée facilement et améliorée afin d'être le plus fidèle possible à la réalité. L'ajout de cibles de référencement permet également d'optimiser la précision et d'accélérer le processus d'orientation mais de par la fragilité de l'objet étudié, cet atout est utilisé avec la plus grande précaution. Avec l'ajout de photographies dans un projet, on augmente le risque d'avoir des points en doublon qui - s'ils ne sont pas fusionnés - entraineront des erreurs dans la modélisation. Cela est dû à la création de plusieurs segments représentant un seul objet physique sur deux séries Illustration 15: Des lots de photographies différentes. D'autre part, les toits que nous cherchons à modéliser d'arêtes en doublon



sont des surfaces planes qui ne peuvent être obtenues sur PhotoModeler qu'en imposant une contrainte à travers une opération fastidieuse qui ne peut être généralisée à l'ensemble des faces des toitures de notre projet. Enfin, le processus permettant l'obtention du fichier de calibration reste long et doit être répété autant de fois qu'il y a d'appareils et de focales utilisés.



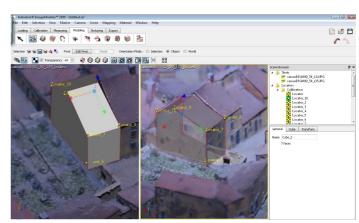


Illustration 16: Reconstruction polyédrique sur ImageModeler

ImageModeler fonctionne également sur le principe de la photogrammétrie multi-images. A partir de plusieurs photographies, il est possible de retrouver leurs orientations et leurs positions relatives. Il n'est pas obligatoire d'utiliser de fichiers de calibration mais les tests conduits montrent que la précision en pâtit.

La numérisation est basée sur l'acquisition de figures géométriques polyédriques. Les volumes peuvent être complexifiés par des outils d'extrusion et de déplacement similaires à ceux rencontrés sur les modeleurs 3D classiques. Néanmoins, on peut croire qu'avec un processus de calibration comparable à celui de *Photo-Modeler* et les outils de reconstruction géométrique proposées par *ImageModeler*, ce logiciel pourrait nous éviter les étapes de correction des surfaces gauches *a posteriori*.

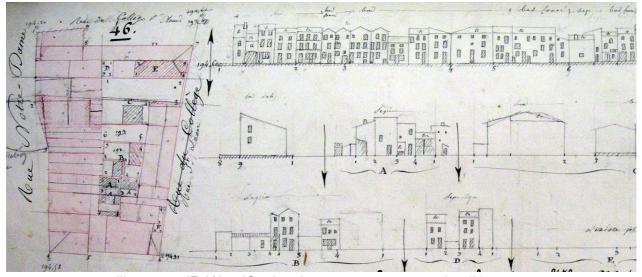


Illustration 17: L'îlot 46 : plan de toiture et une partie des élévations.

Enfin, des documents graphiques sont à notre disposition : épures, documents écrits, cartes, plans et surtout les cahiers de développement sur lesquels figurent les élévations de toutes les constructions. Après observation, il apparait que ces documents ne sont pas fiables. Des constructions n'y sont pas représentées ou représentées de manière peu précise. De plus, ce ne sont pas des plans avec un plan de coupe horizontal mais des plans de toitures. Alors que l'intention initiale était de s'appuyer sur les cahiers de développement pour reconstruire le plan-relief la méthode envisagée jusque là dut être revue. Sans plans, ni élévations, la modélisation ne repose plus que sur les données acquises sur le plan-relief. Une méthode dite « de haut en bas » s'avère donc la plus adaptée pour la restitution de la géométrie irrégulière de la maquette.

3.4.2 Conclusion

Les données qu'il est possible d'extraire avec *PhotoModeler* et les limites des documents graphiques permettent de mettre en évidence le manque d'information pour une reconstruction de « bas en haut » comme il était initialement envisagé. En effet, les pieds des bâtiments sont peu visibles sur les photographies et la fiabilité toute relative des élévations présentes sur les cahiers de développement vient accentuer nos difficultés. L'idée de reconstruire les modèles de « haut en bas » a été proposée assez tôt lors des premiers tests sur *PhotoModeler*. Cette option a été confortée par la suite par l'existence de nombreux travaux, [ZLA98], [VAL10], [KOE07] mettant en avant l'existence de ces deux approches différentes pour la reconstruction tridimensionnelle. En général, il faut choisir entre un processus de modélisation allant de « bas en haut » (extrusion) et un processus de reconstruction de « haut en bas » (projection). Le choix de la méthode à utiliser se fait selon de nombreuses considérations allant du niveau de précision désirée (formes de toits complexes ou simplifiées sous forme de rectangles), des sources disponibles (2D SIG, images aériennes) en passant par l'application finale du modèle.

Les travaux sur l'approche de « haut en bas » ont commencé il y a une quinzaine d'années. En partant des toitures, le niveau de détail atteint est optimal mais nécessite plus de temps de traitement notamment avec les toits complexes dont la restitution n'est pas toujours réussie automatiquement [KOE07]. L'extrusion ne peut se faire que lorsque les empreintes au sol des bâtiments sont connus comme cela est le cas avec des plans cadastraux.

4. PRINCIPE DE LA METHODE.

La méthode retenue (illustration 20) pour la modélisation du plan-relief de Toul peut se décomposer en quatre phases. La première phase consiste en l'acquisition des données pertinentes à la reconstruction tridimensionnelle du plan-relief. Elle est traitée plus en détail dans le chapitre 5. On peut la résumer en deux points:

- 1) La prise de photographies pour la numérisation par photogrammétrie est réalisée dans un premier temps. Plusieurs campagnes de relevés ont été nécessaires pour obtenir des données exploitables et pour couvrir l'ensemble de la zone étudiée (illustration 20.a). Dans un second temps, on procède à l'extraction des segments caractéristiques (arêtes de toitures et murets). Avec la bibliothèque de photographies accumulées lors des différentes campagnes de relevées près de 8 Go nous pouvons extraire relativement facilement les segments formant les toitures et les murets (illustration 20.c).
- 2) Une phase d'acquisition par *Handyscan* pour numériser le terrain à 0,5mm (illustration 20.b). Le logiciel *Geomagic* nous permet ensuite de traiter le nuage de points pour que bâtiments et végétations soient supprimés et que les trous présents dans le maillage soient bouchés pour permettre la création d'un modèle numérique de terrain ou MNT (illustration 20.d).

Dans une deuxième phase (illustration 20.g), il s'agit d'utiliser les données acquises par lasergrammétrie (illustration 20.f) et photogrammétrie (illustration 20.e) afin de restituer le plan-relief. Dans ce chapitre 6, on distinguera alors la reconstruction des parois* des bâtiments de la restitution des fenêtres, cheminées, murets, végétation, etc. qui seront traités ultérieurement.

La restitution des parois des bâtiments s'opère « de haut en bas » sur le logiciel *Plan-Relief* mis au point spécifiquement pour le projet de numérisation du plan-relief de Toul (les arêtes de toits ou les arases de murs étant les plus visibles sur les photographies). Dans ce chapitre 6.2, six étapes peuvent être identifiées :

- 1) Le modèle numérique de la maquette obtenu par capteur 3D est utilisé pour positionner les différents ensembles de segments correspondant aux îlots. Le positionnement est traité dans le chapitre 6.2.1 (illustration 18.a).
- 2) Une fois positionnées, les différentes toitures de chaque îlot sont isolées. Le fractionnement est traité dans le chapitre 6.2.2 (illustration 18.b).
- 3) Pour chaque toiture, on identifie les différentes arêtes les constituant grâce à des algorithmes. L'identification est traitée dans le chapitre 6.2.3 (illustration 18.c).
- 4) Avec les arêtes identifiées, la correction et la reconstruction automatiques sont réalisées. Ces points sont traitées dans le chapitre 6.2.4 (illustration 18.d). La reconstruction des toits est une opération automatique résultant directement de l'identification des arêtes et des paramètres de débords qui leur sont associés (illustration 18.e). La reconstruction des autres parois se fait alors par simple projection orthogonale des contours de toiture sur le terrain achevant ainsi le processus de modélisation « de haut en bas ».
- 5) Une troisième phase voit la mise en place d'ultimes ajustements de manière manuelle pour corriger les erreurs éventuelles de la reconstruction automatique. C'est également à ce moment que le placement des fenêtres (lucarnes, portes cochère; etc.), des bandeaux, etc. est réalisé (illustration 18.e) Outre les éléments décrits ci-dessus, il existe de nombreux éléments traités partiellement par *Plan-Relief*, la restitution de la végétation en fait partie. Elle sera également abordée dans le chapitre 6.3.

Les termes suivis d'un * sont illustrés (illustration 57) et définis dans le lexique.

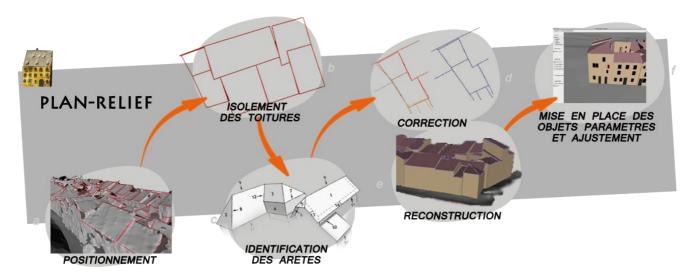


Illustration 18: Détail sur la méthode de reconstruction automatique des parois des bâtiments sur Plan-Relief.

Une fois la volumétrie des bâtiments et des murets restitués, il est nécessaire de texturer les différentes parois. Cette opération se déroule sur le logiciel *Maya* (illustration 20.h). Parce que les textures sont déjà identifiées sur *Plan-Relief*, l'application des textures est rapide.

Pour permettre une navigation fluide dans la base de données conséquente du modèle tridimensionnel du plan-relief de Toul, le choix d'un visualisateur 3D puissant (illustration 20.j) était nécessaire. *Unity* est un moteur de jeu capable de gérer de tel projet. Chaque bâtiment peut être relié à une adresse internet pour plus d'informations sur le bâtiment ou sur l'îlot grâce à divers documents numérisés (cahiers de développement, cadastre, études de l'Inventaire etc.). Enfin, l'interface de *Unity* permet de définir des parcours prédéfinis mais aussi de laisser l'utilisateur libre de tout mouvement dans le modèle 3D.

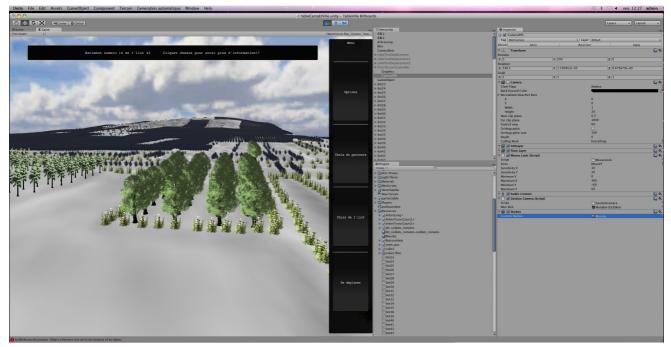


Illustration 19: Interface de Unity

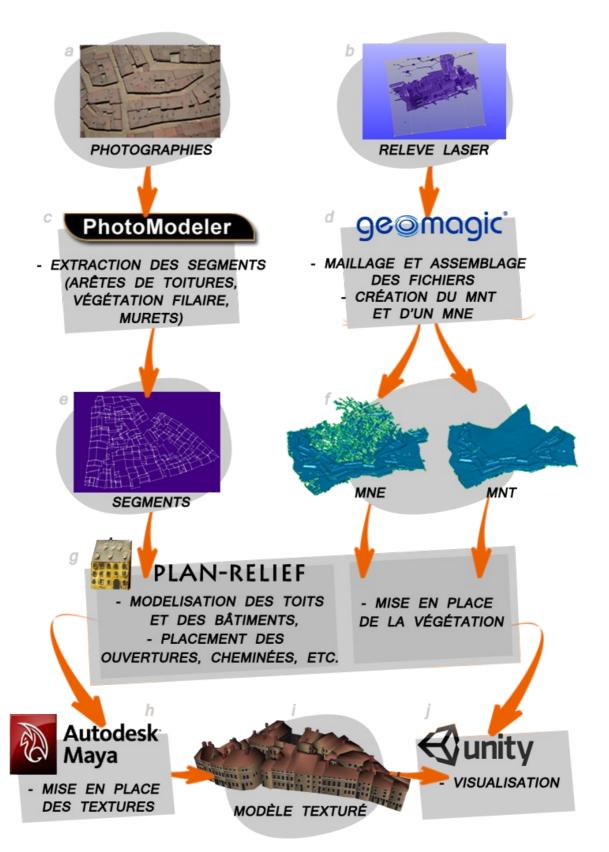


Illustration 20: Récapitulatif des opérations nécessaires à la restitution et à la visualisation du plan-relief de Toul.

5. ACQUISITION.

5.1 Le terrain.

Le plan-relief de Toul présente peu de différence d'altimétrie. Néanmoins, les fortifications et leurs bastions et demi-lunes se prêtaient idéalement à un relevé laser puisque les limites de ces capteurs ne sont pas rencontrées sur ces surfaces.

A l'image des prises de vue photographique, la numérisation par Handyscan s'est heurtée à quelques obstacles liés à la distance entre la zone à numériser et la position de l'opérateur. Rappelons que le centre de la maquette, où se trouvent certains des îlots les plus détaillés que nous avons à numériser, est à plus d'un mètre du bord.



Illustration 21: Numérisation par capteur 3D du plan-relief de Toul

5.2 Les bâtiments.

Pour l'acquisition des données relatives aux bâtiments, on utilise des photographies réalisées au plus près de chacun des îlots étudiés. En s'efforçant de réaliser ces clichés avec de grandes profondeurs de champs, on s'assure sur *PhotoModeler* une orientation optimale et rapide des photographies les unes par rapport aux autres.

C'est pour cela que plusieurs campagnes de prises photographies ont été nécessaires pour documenter la trentaine d'îlots concernés afin de couvrir de manière exhaustive chaque caractéristique des îlots. En l'absence de moyens véritablement professionnels et à défaut d'un éclairage de qualité, la phase d'acquisition s'est étalée sur plusieurs mois afin de compléter les manques au fur et à mesure qu'ils pouvaient apparaître.



Illustration 22: Le centre des îlots peut être encombré de nombreux bâtiments ce qui rend difficile l'identification du type des toitures et presque impossible de déterminer la présence ou non d'ouvertures

Au cours de cette étape, le logiciel de photogrammétrie *PhotoModeler* est utilisé pour numériser les segments essentiels à la reconstruction des bâtiments, c'est-à-dire les différentes arêtes des toits et les murets.

Outre les problèmes d'accès à certains angles de vues dans des îlots denses et les limites déjà rencontrées dans la phase d'expérimentation comme les pertes de temps à localiser et à fusionner les points et les segments en doublons (illustration 15), d'autres enjeux apparaissent. Aucune des entités créées est un polygone. Les qualités de planéité, de symétrie ou de parallélisme s'obtiennent difficilement sur ce logiciel, c'est pourquoi les problèmes de surfaces gauches et autres rapports géométriques sont gérés ultérieurement. On peut avancer quelques raisons à ce problème de géométrie :

- Des causes logicielles. Il est possible qu'une mauvaise calibration de l'appareil photographique ou une mauvaise orientation d'un lot de photographies résultent en la création, dans le meilleur des cas de points peu fiables et, dans le pire des cas d'un lot complet de segments mal positionnés.
- Des causes propres à la maquette. La première est l'état de conservation du plan-relief. Les matériaux dont est constituée la maquette, carton mâché ou papier notamment, résistent mal à humidité. Certaines surfaces se décollent et ondulent ce qui rend la numérisation de ce genre de surface approximative.

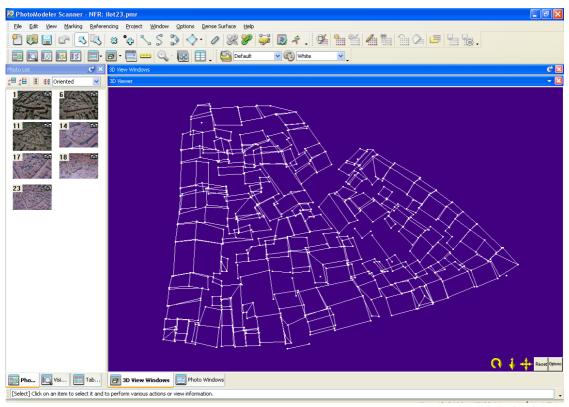


Illustration 23: L'îlot 23 sur PhotoModeler prêt à être exporter vers Plan-Relief (PM)

Néanmoins, ce problème de géométrie peut être traité de diverses façons. Tout d'abord par l'utilisation d'informations données par *PhotoModeler* comme le *maximum residual* : un indice de précision de chacun des points créés. Calculé d'après la position de l'ensemble des points sur le lot complet de clichés orientés, il renseigne l'écart maximum en pixels entre la position d'un point sur la photographie où il présente la meilleure position et la photographie où elle est la moins bonne. En moyenne, on parvient à conserver un écart de moins de moins de 10 pixels. L'autre moyen à notre disposition pour corriger les rapports géométriques entre les points est le traitement automatique (chapitre 6.2.4) et manuel (chapitre 6.3.1) du logiciel développé spécialement pour le projet de restitution du plan-relief de Toul.

Étant donné que l'acquisition a été effectuée que par une seule personne, l'expérience acquise sur le logiciel m'a permis de réduire considérablement le temps passé à acquérir les arêtes des toitures et de murets. Alors que près de quarante photographies furent nécessaires pour récupérer les segments essentiels de la table de campagne, en moyenne, vingt photos seulement étaient nécessaires pour chacun des îlots de la table de ville. Là aussi, d'une vingtaine de photos, on a pu passer à sept photographies et une demi-journée d'acquisition pour obtenir les arêtes de l'îlot 23 - le plus grand de la table de ville – tout en conservant un degré de précision comparable.

6. RESTITUTION.

6.1 Le terrain.

Une fois la maquette numérisée, on dispose d'un Modèle Numérique d'Élévation ou MNE sur lequel sont présents bâtiments, végétation, murets, etc. Le MNE s'oppose au MNT, le Modèle Numérique de Terrain sur lequel n'est conservé que le terrain afin d'isoler le relief de la zone étudiée.



Illustration 24: Une partie des fortifications présente sur le plan-relief

Le modèle numérisé subit deux traitements sur Geomagic :

Le premier fractionne le MNE en autant de parties qu'il y a d'îlots étudiés. Cette opération permet de repositionner les segments issus de *PhotoModeler* sur le MNE. En faisant correspondre ces arêtes au maillage, on s'assure du bon positionnement de l'îlot sur ses trois axes et relativement aux autres îlots. Cette étape est abordée plus en détail dans le chapitre 6.2.1.

Le second traitement permet l'obtention d'un MNT sur lequel on peut lire la topographie de la zone étudiée. Le dénivelé présent en centre ville est peu visible du fait de la densité de bâtiments et du peu de relief (un ou deux mètres soit quelques millimètres au 1/600) mais en périphérie, au niveau des fortifications et de la campagne, il est beaucoup plus prononcé (quelques dizaines de mètres). Ce modèle servira de socle au modèle final.

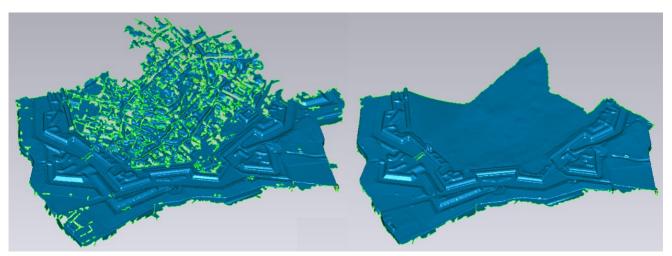


Illustration 25: MNE et MNT sur la partie du plan-relief étudiée.

6.2 Les bâtiments.

Nous avons vu plus haut que la modélisation paramétrique se fondait sur la connaissance architecturale des objets étudiés. Dans notre projet, aucun traité n'existe et les documents à notre disposition ne sont pas fiables. Pour acquérir ces connaissances et définir des règles, il est nécessaire d'analyser le plan-relief et d'en extraire les typologies pour pouvoir décrire les types courants afin de classifier les composants de chacune d'elles. Ces composants (rives*, faîtages*, égout*,...) pourront alors être paramétrés (saillies de rives*, horizontalité du faîtage, débord d'égout,...) en fonction des cas à restituer.

Deux grandes familles de toits ont été identifiées, celle dite simple et l'autre complexe. Les toitures simples ont une volumétrie régulière (parallélépipédique) et une forte symétrie. Ainsi sont regroupées dans cette première grande famille les toitures terrasses (trois seulement) et en pente (au nombre de 910) tandis que dans les toitures complexes se trouvent des toitures aux imbrications singulières, uniques et pouvant être composées de différentes types de toitures simples. Parmi les toitures en pente, on retrouve cinq grandes typologies : appentis* (519), bâtière* (276), pavillon* (12), mansarde* (32), à croupe* (32 croupes*, deux demicroupes* et trois mansardée à croupes*) et à révolution* (cinq flèches).

Ces typologies nous permettent de définir les composants caractéristiques de chacune des toitures que cela soit au niveau des arêtes (relations de parallélisme,...) ou au niveau des pans de toitures (planéité,...). Pour pouvoir paramétrer les composants, il faut les isoler. Rives, faîtage, égout, etc, sont identifiés par des algorithmes sur lesquels nous reviendrons plus tard (chapitre 6.2.3) et dont on a testé l'efficacité sur les différents types de toitures.

Les algorithmes d'identification des arêtes s'avèrent relativement efficaces pour qualifier l'ensemble des arêtes d'un squelette de segments issu de *PhotoModeler* en s'astreignant totalement de la typologie de la toiture. Ce point est d'autant plus précieux que l'analyse typologique montre une grande variété de cas du point de vue de la complexité géométrique, de la relation aux toits voisins et de l'état de conservation, ce qui rend inutilisable la classification. De nombreuses toitures rentrent en effet dans la catégorie des toitures complexes n'appartenant à aucune typologie. Partir d'une typologie pour dicter les paramètres de ces composants n'est pas la meilleure méthode dans notre cas, il paraît plus simple de paramétrer directement les arêtes et les pans associés.

Les termes suivis d'un * sont illustrés (illustration 57) et définis dans le lexique.

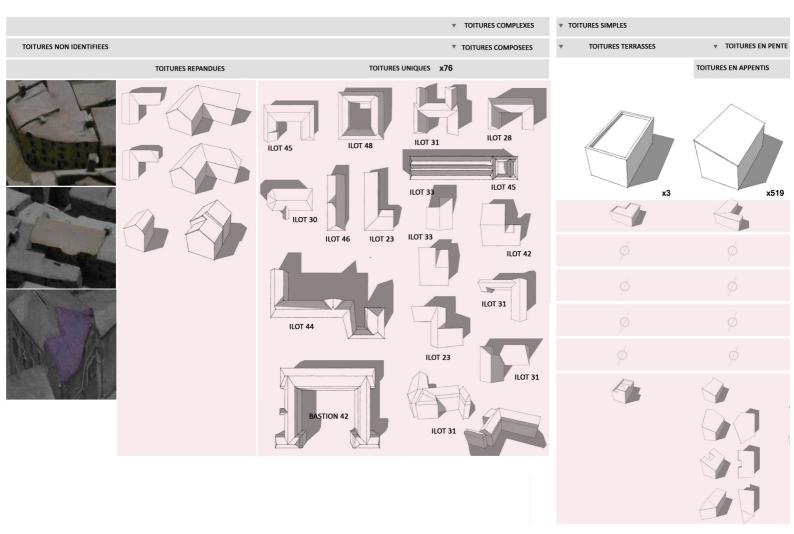
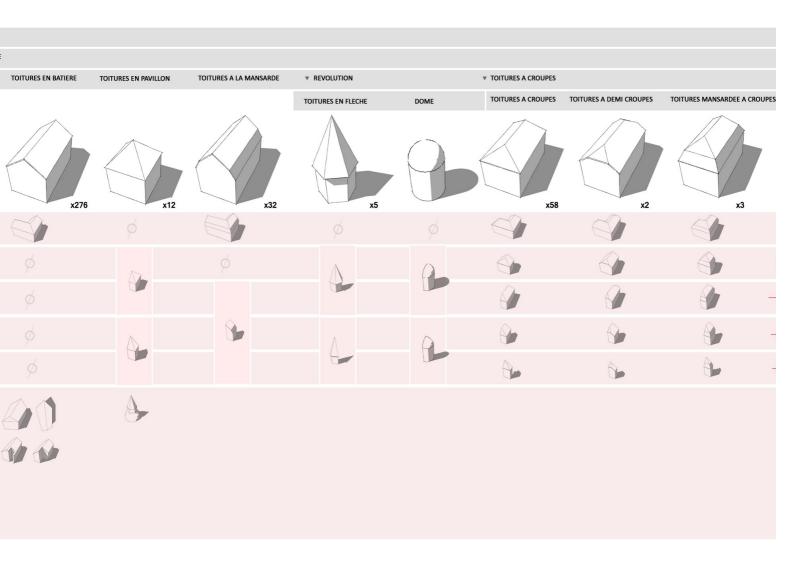


Illustration 26: Tableau de référencement des typologies établis au début du projet. A gauche : les toitures complexes. A droite : les toitures simples classées par types avec les variations pour chacune d'elle au niveau du plan (en L, T, U ou à cours), de la coupe ou de la division (longitudinale, transversale, quartier, etc.) et des cas irréguliers mais apparentés.



6.2.1 Positionnent

En parallèle de l'extraction des segments, le MNE acquis lors du traitement sur *Geomagic* (chapitre 6.1) est utilisé dans la phase de positionnement. Fractionné en autant de parties qu'il y a d'îlots et disposant des segments exportés depuis *PhotoModeler*, l'opération consiste à positionner les segments d'un îlot sur le MNE.

Parce que le MNE et le MNT partagent un même repère, l'opération de repositionnent permet de consolider les données altimétriques issues de *Photo-Modeler* grâce aux nuages de points créés par numérisation laser. On s'assure ainsi une plus grande précision quant aux hauteurs des bâtiments. Une fois l'îlot positionné, le MNE est supprimé pour que ne subsiste que le MNT.

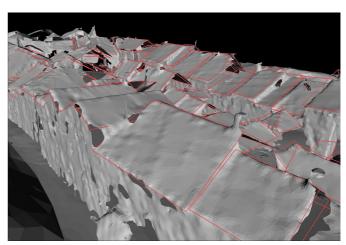
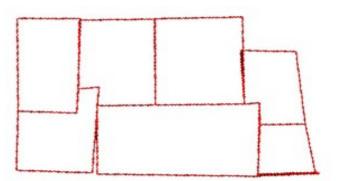


Illustration 27: Positionnent des segments sur le modèle numérique d'élévation. (Plan-Relief)

6.2.2 Fractionnement.

Avant d'entamer le processus d'identification des arêtes, il est nécessaire de fractionner les segments créés sur *PhotoModeler* en lots correspondant à une toiture, ou à une toiture complexe. Pour un segment donné, nous cherchons tous les segments qui lui sont consécutifs c'est-à-dire les segments qui partagent un point commun. Si deux toits partagent un même point, il n'y aura qu'un seul lot de segments pour ces toits faisant de lui un toit complexe. La classification des segments permet à l'algorithme de gérer correctement ces cas complexes.

Pour chacun des lots de segments isolés, on peut appliquer le processus d'identification présenté dans les chapitres suivant. Avec les arêtes identifiées, ce sont aussi les différentes types de pans de toitures qui sont connus : pan simple*, croupe*, demi-croupe*, terrasson* et brisis*. Outre la correction de leur géométrie, c'est aussi l'assignation de textures qui en est facilité. Cette étape et les trois suivantes est un des processus gérés automatiquement lors de la restitution.



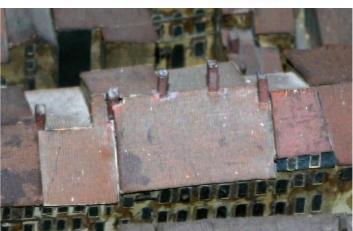


Illustration 28: Suite de segments assimilée à un seul toit complexe dans l'îlot 42 sur Plan-Relief et les toits correspondant sur la maquette. (Plan-Relief)

Les termes suivis d'un * sont illustrés (illustration 57) et définis dans le lexique.

6.2.3 Identification.

PhotoModeler ne nous permet pas d'obtenir des polyèdres comme le sont les toitures (et les bâtiments) étudiées. Au lieu de cela, les solides obtenus sont tous composés de surfaces gauches dont les arêtes n'entretiennent aucun rapport de symétrie. Pour corriger cela, il est nécessaire d'appliquer des contraintes différentes selon le type d'arête. L'établissement de ces contraintes s'appuie uniquement sur des observations, sur les rapports et propriétés géométriques entretenus par les différents types d'arêtes pouvant être présents dans un toit.

On cherche à qualifier le plus précisément possible chacune des arêtes des polyèdres afin de pouvoir les paramétrer indépendamment. Évidemment, certains paramètres sont supposés avoir des valeurs identiques (saillie de rive et débords des égouts de demi-croupes par exemple), mais on se réserve la possibilité de pouvoir modifier ces valeurs face aux altérations subies par le plan-relief.

Contour

Pour isoler les arêtes formant le contour, on cherche le polygone englobant concave ou convexe. Il s'agit des arêtes formant, vue en plan, un polygone dans lequel est présent le reste des arêtes. Pour arriver à identifier ces arêtes, on s'inspire de la Marche de Jarvis, un des algorithmes utilisés pour identifier l'enveloppe englobante convexe de points à la différence qu'on cherche à englober des segments. L'enveloppe englobante d'un objet ou d'un regroupement d'objets géométriques étant le polygone le plus petit englobant ces objets.

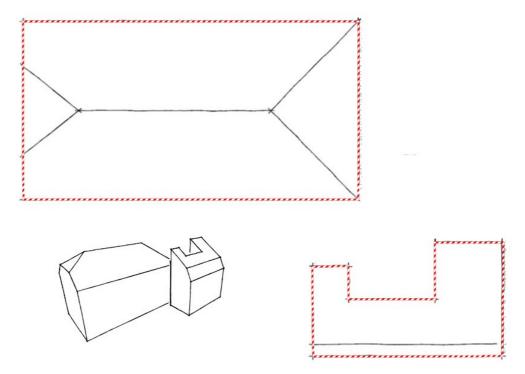


Illustration 29: L'enveloppe englobante peut être concave ou convexe

Illustration 30: Principe de la Marche de Jarvis

On commence par chercher le point P1 dont l'ordonnée est la plus petite. Le point P2 est celui qui aura l'angle polaire le plus petit par rapport P1. On répète cette dernière opération autant de fois qu'il faut pour retrouver le point P1 .

début

L : le lot contenant l'ensemble des segments d'un toit

C: le lot d'arêtes de type contour

B: le point dont les coordonnées (x et z) ont les valeurs les plus petites, l'axe (Oy) étant l'axe vertical

S1 : le segment parallèle à axe (Ox) passant par B

Tant qu'il y a des segments dans le lot L et que nous ne sommes pas retourné au point B

Sélectionner le segment *S2* tel que *S2* et *S1* forment le plus petit angle polaire.

Enlever S2 de L

S1 = S2

Ajouter S2 à C

fin.

Afin d'éviter des erreurs dues aux pans de toitures se chevauchant, le calcul de l'angle doit être robuste pour que soit pris en compte les cas les plus complexes. Par exemple, pour le cas de rives devant se trouver dans le même plan vertical, l'algorithme doit être modifié et inclure une condition angulaire. Si l'angle formé par deux segments est inférieur à une valeur donnée, alors on poursuit l'algorithme avec ce segment plutôt qu'avec le segment qui forme la valeur angulaire polaire la plus petite.

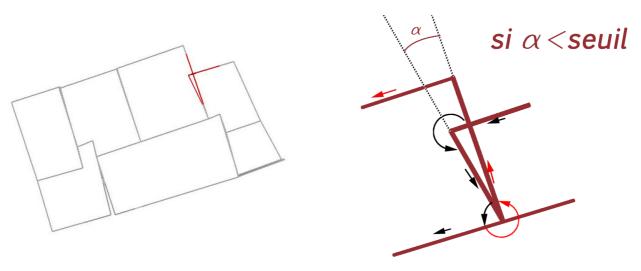


Illustration 31: Rives se chevauchant : le tracé en noir montre le parcours de l'algorithme, en rouge le parcours attendu.

Le contour n'est pas constitué que d'égouts puisque des rives, des rives de têtes et même des faîtages ont pu être intégrés à cette catégorie. Ils sont isolés dans la partie suivante. Néanmoins, les segments pour lesquels aucune règle n'aura été appliquée appartiendront tous au groupe des égouts.

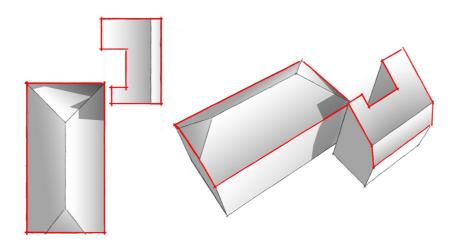


Illustration 32: en rouge, les segments de type contour (C) formant le polygone englobant

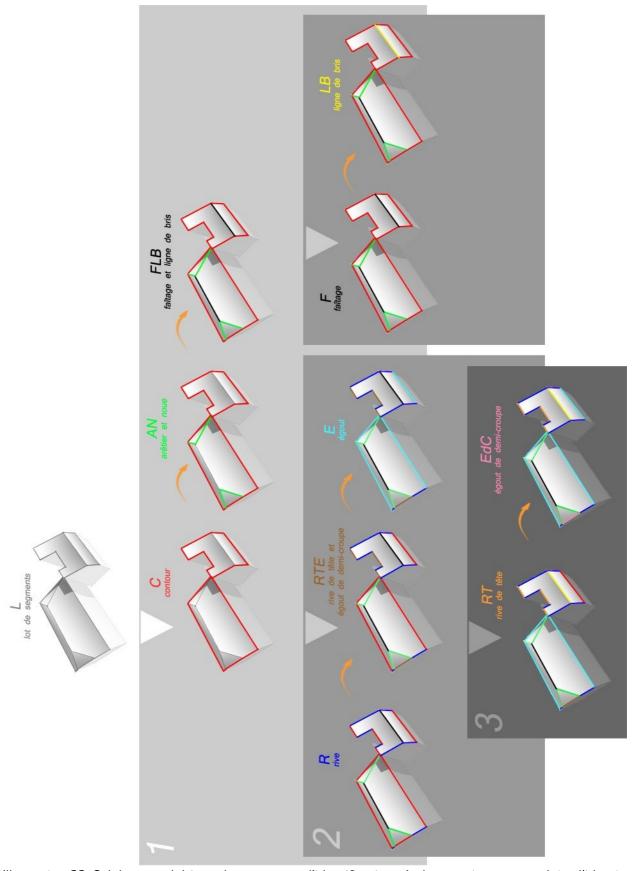


Illustration 33: Schéma synthétisant le processus d'identification. A chaque niveau, on précise l'identité de chacune des arêtes d'une toiture

Arêtiers, noues, faîtage et lignes de bris

Les noues* et les arêtiers* sont les seules arêtes restantes à présenter de grandes variations en altitude, loin des valeurs proches de l'horizontalité de l'ensemble des autres arêtes. Parmi les segments restant, on peut donc facilement isoler ceux qui ne sont pas horizontaux.

début

AN: le lot d'arêtes de type arêtier et les noue

FLB: le lot d'arêtes de type faîtage et les ligne de bris

a: seuil

 S_1 : l'extrémité 1 (début) du segment S

 S_2 : l'extrémité 2 (fin) du segment S

L: le lot contenant l'ensemble des segments d'un toit

Si dans le lot de segments, le segment S est tel que la différence d'altitude entre S_2 et S_1 est supérieure au seuil a

Alors le segment S appartient au type AN

Sinon le segment appartient au type *FLB*

fin.

Les arêtes qui ne sont ni identifiées en tant que contour ni en tant qu'arêtier/noue rentrent obligatoirement dans la catégorie faîtage ou ligne de bris*.

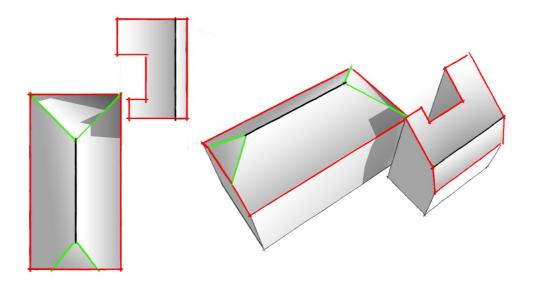


Illustration 34: En vert, les segments de type arêtier et noue (AN) et en noir, les segments de type faîtage et ligne de bris (FLB)

Les termes suivis d'un * sont illustrés (illustration 57) et définis dans le lexique.

Une seconde phase permet d'affiner le processus d'identification des différentes arêtes à partir des trois catégories que nous venons d'identifier (contours, arêtiers/noues et faitages/lignes de bris). Aucune arête est sans identifiant mais le type contour contient encore les types rives, rives de tête et égouts, tandis que faîtages et ligne de bris sont encore confondus. Il s'agit maintenant d'opérer au sein de ces catégories pour affiner l'identification en enlevant certains types d'arêtes.

Rives

Bien que l'identification des arêtes ne soit pas achevée, une typologie de toiture peut être identifiée. Les toits qui ne possèdent que des arêtes appartenant au type contour ne peuvent être que des toits en appentis. L'identification de la rive de tête est simple puisqu'il s'agit du segment le plus haut. Les rives sont identifiées, comme pour les arêtiers et les noues, par l'absence d'horizontalité.

Ainsi, parmi les segments identifiés comme contour, on applique la règle utilisée pour isoler les arêtiers et les noues afin de récupérer les arêtes de type rive. Tout comme les arêtiers et les noues, la différence d'altitude entre les extrémités des segments de type rive est au delà d'un seuil permettant de ne pas sélectionner abusivement des arêtes dont l'acquisition sur *PhotoModeler* a été approximative.

début

C : le lot d'arêtes de type contour

R: le lot d'arêtes de type rive

a: seuil

 S_1 : l'extrémité 1 (début) du segment S

 S_2 : l'extrémité 2 (fin) du segment S

Si dans le lot de segments C, le segment S est tel que la différence d'altitude entre S_2 et S_1 est supérieure au seuil a

Alors le segment *S* appartient au type *R*

fin.

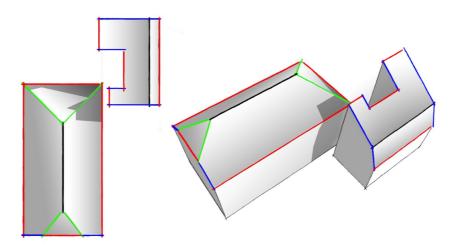


Illustration 35: en bleu, les segments de type rive (R)

Rives de tête et égouts de demi-croupes

Parmi les segments appartenant au groupe contour, nous avons identifié les rives mais il existe encore des segments aux caractéristiques différentes. On peut ainsi isoler les rives de têtes* et égouts de demicroupes des égouts grâce à l'identité des segments contigus. En effet, rives de tête et égouts partagent forcement un point en commun avec des segments de type rives. Il s'agit des points les plus hauts de ces segments.

début

C: le lot d'arêtes de type contour

R: le lot d'arêtes de type rive

RTE: le lot d'arêtes de type rive de tête ou égout (de demi-croupes)

 S_{C1} : l'extrémité du segment S_{C}

 S_{R1} : l'extrémité 1 du segment S_{R}

E : le lot d'arêtes de type égout

Si dans le lot de segments C et R, $S_{C1} = S_{R1}$

Alors si l'altitude du point S_{R1} est supérieure à l'altitude du point S_{R2}

Alors le segment S_C appartient au type RTE

Sinon le segment S_C appartient au type E

fin.

La nature des segments du contour a été précisée une première fois, ce qui a permis d'isoler les rives de têtes et les égouts de demi-croupes. Il reste à distinguer ces deux derniers types de segments en utilisant une propriété simple, déjà utilisée dans le cas précédent mais appliquée uniquement aux segments du groupe rives de tête et égouts de demi-croupes. Distinguer les égouts de demi-croupes des égouts permet de paramétrer indépendamment les deux types d'arêtes. En effet, les égouts de demi-croupes ont, par défaut, un débord qui sera le même que celui des rives et pas nécessairement identique au débord d'égout.

début

RTE: le lot d'arêtes de type rive de tête ou égout (de demi-croupes)

RT: le lots d'arêtes de type rive de tête

EdC: le lot d'arêtes de type égout de demi-croupes

Si dans le lot de segments RTE, la hauteur du segment S est supérieur à la moyenne des hauteurs des segments du lot RTE

Alors le segment *S* appartient au type *RT*

Sinon le segment *S* appartient au type *EdC*

fin.

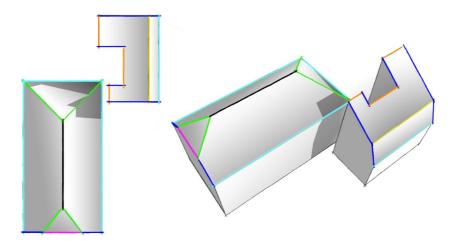


Illustration 36: en violet les arêtes de type égout de croupe (EdC), en orange, les arêtes de type rive de tête (RT) et en cyan, les égouts (E).

Ligne de bris

Parce qu'il existe des toitures à la Mansart sur le plan-relief de Toul, on peut trouver dans les lots de segments des arêtes correspondant au ligne de bris. L'identification de ce type est d'autant plus important dans notre cas qu'il sépare deux pans dont les textures sont généralement différentes, traduisant un matériaux de couverture propre à chaque pan.

Faîtage et ligne de bris sont encore confondus. Pour isoler les lignes de bris, il suffit d'ajouter une condition sur leur position verticale qui est obligatoirement inférieure à celle des faîtages. L'algorithme appliqué est identique à celui utilisé pour isoler les égouts de demi-croupes des rives de tête à ceci près qu'on l'adapte au lot de segments faîtages et lignes de bris.

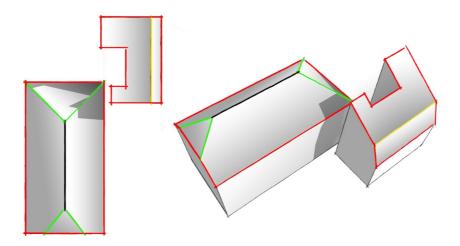


Illustration 37: en jaune, les arêtes de type ligne de bris (LB)

6.2.4 Correction et reconstruction automatique

Dernières opérations automatiques, la correction et la reconstruction permettent, en s'appuyant sur l'identification des arêtes, d'appliquer des contraintes géométriques afin de corriger les erreurs accumulées (imbrication de bâtiments notamment) lors de la phase d'acquisition sur *PhotoModeler* et d'obtenir des géométries similaires à celles de la maquette.

Le premier type de correction est réalisé sur le plan xz, (y étant l'axe vertical) et se rapporte aux problèmes de parallélisme. Pour chaque toit, les segments voisins sont mis parallèle dès lors que l'angle qu'il forme est inférieur à un seuil donné (illustration 38). Une fois cette correction apporté parmi les segments d'un toit, on compare ces derniers aux segments des toits voisins.

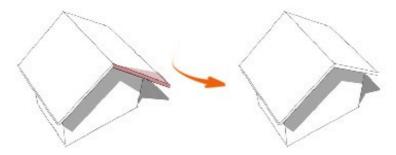


Illustration 38: La correction du parallélisme de segments voisins : le cas des rives est significatif.

Pour cela, on commence par définir si un segment à une influence sur l'autre grâce à un algorithme qui détermine la distance séparant le centre des deux segments. Si la distance est supérieure à un certain seuil, les segments ne s'influenceront pas. Par contre, si deux segments ont une influence l'un sur l'autre, on a deux alors deux choix selon la valeur de la distance séparant leurs centres (illustration 39) :

- en deçà d'un seuil a, on les rend parallèle (illustration 39.a),
- en deçà d'un seuil *b*, (inférieur lui-même au seuil *a*) on les superpose : les segments sont dans un seul plan vertical (illustration 39.b).

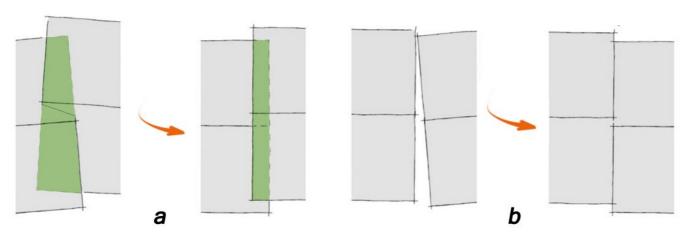


Illustration 39: Segments mis parallèle ou superposés (en vert : recouvrement)

Bien que les débords de toitures aient des valeurs affectées automatiquement au moment de l'identification des arêtes, les contraintes de parallélisme influent les valeurs des débords des toitures. Lorsque deux segments sont superposés, les valeurs des débords des deux arêtes correspondantes sont nulles. Par contre, lorsque les segments sont mis parallèle, il y a deux possibilités :

- Si les segments ne sont pas à la même altitude, l'arête supérieure aura un débord égal à la valeur du recouvrement tandis que l'autre arête n'aura aucun débord (illustration 40a).
- Si les segments s'intersectent, la valeur du débord de chacune des deux arêtes sera égale à la moitié du recouvrement (illustration 40b).

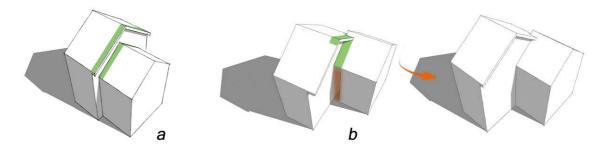


Illustration 40: cas a : seul le toit supérieur à un débord. Cas b : les débords sont raccourcis d'une valeur égale à la moitié du recouvrement. (en vert : recouvrement)

début

S1 : Segment ayant pour milieu M1 et appartenant à la toiture T1

D1: valeur du débord de S1

S2: Segment ayant pour milieu M2 et appartenant à la toiture T2

D2: valeur du débord de S2

Si l'angle formé par S1 et S2 est supérieur à un seuil a

alors si la distance entre M1 et M2 est inférieur à un seuil b et si la longueur de S1 est supérieure à la longueur de S2

alors S2 est superposé à S1 et D2 et D1 = 0

sinon S1 est superposé à S2 et D2 et D1 = 0

sinon si la distance entre M1 et M2 est inférieure à un seuil c

alors S1 et S2 sont mis parallèle

et si S1 intersecte S2

Alors

 $D1 = \frac{1}{2}$ de la longueur de la partie commune

 $D2 = \frac{1}{2}$ de la longueur de la partie commune

Sinon

Si l'altitude de S1 est supérieure à l'altitude de S2

Alors D1 = la longueur de la partie commune, D2 = 0

Sinon D2 = la longueur de la partie commune, D1 = 0

fin.

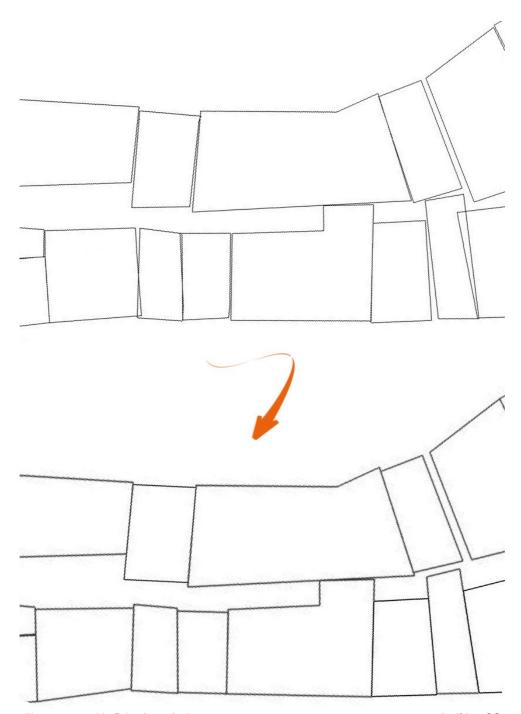


Illustration 41: Résultat de la correction automatique sur une partie de l'îlot 33. Les mitoyennetés sont corrigées ce qui peut entrainer des problèmes au niveau des venelles*. (vues de toitures) (Plan-Relief)

Grâce à la classification des arêtes de toits et aux corrections automatiques dont nous venons de décrire quelques exemples, on peut procéder à la reconstruction des murs des bâtiments. Des contraintes et des paramètres ont été appliqués et restent modifiables (chapitre 6.3) si nécessaire. Il s'agit de l'épaisseur et de la planéité du toit mais aussi de l'horizontalité des faîtages.

6.3 Paramètres et ajustements.

La correction et la reconstruction automatiques permettent de traiter un grand nombre d'incohérences héritées à diverses étapes, lors des opérations d'acquisition sur *PhotoModeler* ou à cause des différents seuils fixés lors du processus de reconstruction décrit plus tôt. Néanmoins, même si la plupart des corrections sont justifiées, des cas peuvent ne pas avoir été traités ou inversement, les corrections ont pu être appliquées à des objets qui n'en avaient pas besoin.

6.3.1 Interface pour les ultimes ajustements manuels.

Sur *Plan-Relief*, une interface nous permet alors d'agir localement sur les corrections automatiques appliquées plus tôt. Les valeurs et les seuils des paramètres et des contraintes peuvent être ajustés à l'échelle d'un segment, pour modifier son identité ou son débord par exemple, ou d'un toit, pour lequel l'épaisseur, la planéité, l'horizontalité, etc. sont quelques-uns des paramètres modifiables. Si ces mesures sont sans efficacité, il reste possible de déplacer les points problématiques.

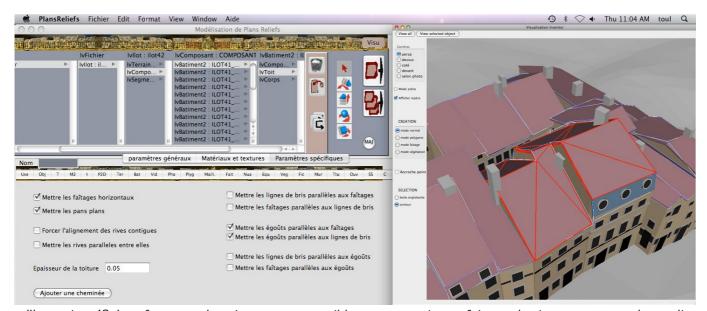


Illustration 42: Interface pour les ajustements possibles sur une toiture : faîtages horizontaux, pans plans, alignement des rives contiguës, rives parallèles, parallélisme des faîtages et des lignes de bris, des égouts aux faîtages, des égouts aux lignes de bris, des lignes de bris aux égouts et des faîtages aux égouts. (Plan-Relief)

Une fois les derniers ajustements apportés aux parois et pour compléter la restitution des bâtiments, il est nécessaire d'y ajouter un certain nombre d'objets. Les ouvertures et les bandeaux font partis des objets paramétrés à placer sur les murs tandis que les cheminées et les lucarnes sont propres aux toits. Comme nous le verrons par la suite, des problèmes de dimensionnement et de localisation sont rédhibitoires. Outre les fonctions de placement sur une paroi déterminée ou le dimensionnement de l'objet, l'interface permet également de simplifier les opérations de duplication d'un même objet.

6.3.2 Objets paramétrés.

L'interface de *Plan-Relief*, permet de placer les objets paramétrés suivants : bandeau, cheminée, quatorze type de fenêtres, six types de murets et plusieurs types d'arbres.

6.3.2.1 Fenêtres et autres objets présents sur les façades.

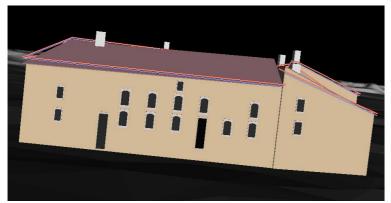


Illustration 43: La porte cochère ou l'oculus sont deux des types implémentés

Les premiers objets à être placés sur la maquette 3D sont ceux présents sur les façades des bâtiments. Fenêtres, portes et bandeaux ont été étudiés pour définir les modèles les plus couramment rencontrés sur la maquette. Une quinzaine de modèles ont été créés, d'autres, moins fréquents, sont en passe d'être ajoutés.

L'interface permet de faciliter les opérations de duplication d'un même objet grâce à des outils de distribution ou d'héritage de dimensions (illustration 43). On peut citer :

- la distribution d'un objet sur la longueur d'une façade avec un intervalle régulier ou non et une position centrée ou non,
- la distribution d'un objet verticalement avec un intervalle,
- la suppression d'un objet dans une distribution pour y substituer un autre objet, héritage des dimensions de la parois par l'objet (ouverture de type grange ou bandeau).



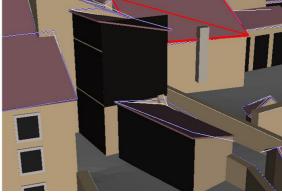


Illustration 44: Ces deux cas illustrent les possibilités de placement offertes par l'interface : distribuer horizontalement, verticalement, enlever un élément d'une distribution ou hériter des dimensions de la parois. (Plan-Relief)

Certains problèmes se produisent pendant le dimensionnement de ces objets. Alors que les cheminées peuvent être facilement localisées (chapitre 6.3.2.2.), les ouvertures sont un véritable problème. Sans les plans 2D, nous ne pouvons compter que sur les photos et, parce que nous ne pouvons pas avoir de vues frontales des façades, les hauteurs sont écrasées et les ouvertures ont tendance à être déformées.

6.3.2.2 Cheminées.

Les cheminées sont omniprésentes sur les toits des différents îlots du plan-relief de Toul. Leurs positions sur les toits varient grandement sans que les cheminées ne présentent de différence morphologique. Elles sont représentées par de simples parallélépipèdes qui peuvent toutefois entretenir des ancrages assez variables avec le reste du bâtiment.



La modélisation des cheminées n'est pas encore réalisée de manière fidèle puisque la cheminée est traitée, pour l'instant, comme un objet rapporté, apposée à la toiture. Lorsqu'elle est située sur le faîtage ou au milieu d'un pan de toiture (e), il n'y a aucun problème à modéliser la cheminée. Seuls les cas ou elle vient briser l'égout ou une rive (a,b et c) ne sont pas gérés fidèlement. Dans cette situation, où la cheminée est dans la continuité directe du pignon* et/ou du goutterau*, la liaison entre les deux objets suit deux schémas : soit la cheminée est collée de manière à donner l'illusion de continuité (a et b), soit elle fait partie intégrante du bloc de tilleul ayant servi à modéliser la base du bâtiment (c). Dans l'état actuel du logiciel, rien ne permet de rendre ces caractéristiques car réaliser une opération booléenne sur les toits n'est pas encore possible. Dernier cas (d), la cheminée est située sur la façade. Là encore, l'objet cheminée ne peut être utilisé pour restituer la réalité. On détourne alors l'objet bandeau (chapitre précédent) pour recréer de telles cheminées.

Les termes suivis d'un * sont illustrés (illustration 57) et définis dans le lexique.

La localisation et le dimensionnement des cheminées sur les toits ont été accomplies facilement grâce à l'utilisation du MNE qui laisse apparaître de manière imparfaite les cheminées. Le maillage est néanmoins suffisamment précis pour servir de patron à la restitution des cheminées.

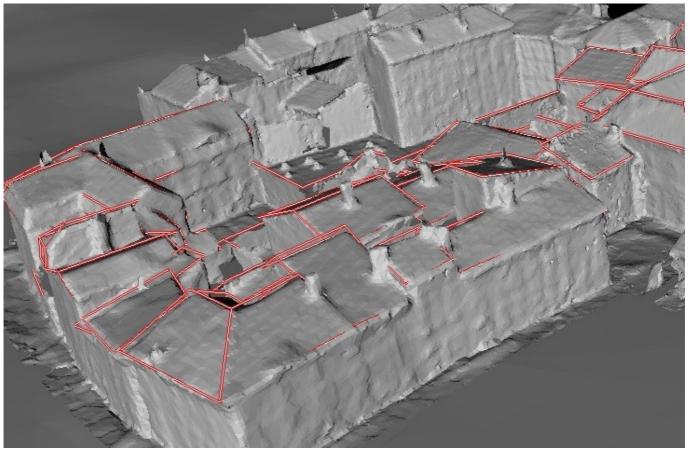


Illustration 46: Les cheminées sont suffisamment visibles sur le MNE pour être utilisées dans les positionner et les dimensionner (Plan-Relief)

6.3.2.3 Murets.

Le processus de restitution des murets commence par le recensement des différents types de murets présents sur la maquette. Cette étude typologique a été effectuée sur la table de campagne, là où se concentrent les différentes variations de murets et palissades que l'on peut retrouver sur le plan-relief.

Sept types de murets ressortent de l'analyse de la table de campagne (illustration 47), haie vive* (a), haie vive régulière (b), muret mixte (c), muret à créneaux* (d), muret (e), palissade* (f) et grilles (g) sont ainsi identifiés. La présence d'éléments de végétation dans les objets de type murets s'explique simplement par leur processus de modélisation mis en œuvre qui est conduit de manière similaire à celui des murets d'éléments. La linéarité de ces objets est en effet gérée dès le processus d'acquisition photogrammétrique sur *PhotoModeler* à la manière des toitures que l'on peut résumer en segments caractéristiques. D'ailleurs, l'État des Dépenses établis en avril 1861 compte les haies en terme de mètre linéaire (38 mètres de rubans de soies pour les haies) à la différence du reste de la végétation.

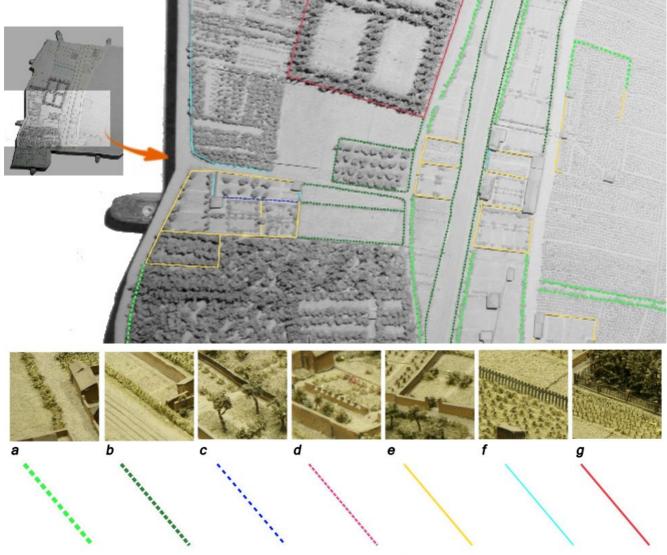
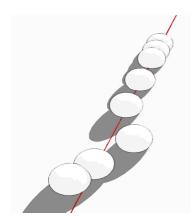


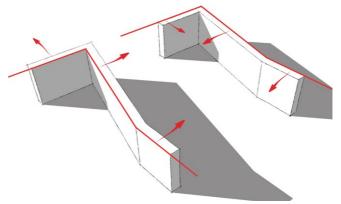
Illustration 47: haie vive*, haie vive* régulière, muret mixte, muret à créneaux*, muret simple, palissade* et grille sont les sept types de murets référencés

Les termes suivis d'un * sont illustrés (illustration 57) et définis dans le lexique.

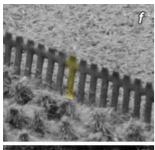


La restitution des murets identifiés ci-dessus suit différents schémas. Le premier correspond aux murets de végétation de type haie vive (a) et haie vive régulière (b). Pour la restitution de ces éléments, on copie un modèle le long du segment, ou des segments, issus de *PhotoModeler* en se gardant la possibilité de modifier les intervalles séparant les modèles entre eux mais aussi perpendiculairement à l'axe définit par le segment *PM* (axe rouge sur l'illustration). Avec ces paramètres, on peut donner un caractère moins linéaire aux haies reconstruites et être plus prêt de l'aspect des rubans de soie.

Le second schéma permet la restitution des murets pleins (c et e). Ces deux typologies peuvent être reconstruites facilement en extrudant le profil caractéristique du muret le long du segment, ou de la série de segments, acquis sur *PhotoModeler* (axes rouges sur l'illustration). Les seuls paramètres identifiés offrent la possibilité de développer le muret d'un côté ou de l'autre du segment et de jouer sur l'épaisseur du muret restitué. Ces paramètres se retrouvent également pour les autres types de murets.



Enfin, on peut distinguer dans la méthode de restitution les murets qui ont une géométrie plus complexe. Les palissades (f) et les grilles (g) constituent cette dernière catégories. Ceux-ci, comme les murets de type végétation, sont à l'instar d'une chaîne, constitués de maillons identiques. C'est la répétition d'un seul maillon qui permettra de restituer l'ensemble du muret. La modélisation de ces éléments peut, à la différence des éléments décrits plus tôt, poser des problèmes au niveau des changements de direction comme on peut le voir sur l'illustration 48. Pour gérer ces changements de direction, trois solutions ont été envisagées :





- La première modifie la position du maillon sur lequel le changement de direction s'opère. Alors que l'extrémité jouxtant le maillon 2 est soumise au tracé du segment, l'autre extrémité est directement rabattue sur le segment suivant (illustration 48a).
- La seconde solution conserve le nombre de maillons sur le segment posant problème mais modifie leur longueur pour la faire correspondre à la longueur du segment. Ainsi, si le segment supporte cinq maillons, la longueur des maillons aura pour nouvelle valeur le cinquième de la longueur du segment PM (illustration 48b).
- Une troisième possibilité, proche de la précédente, consiste à adapter le tracé au nombre et à la longueur des maillons. Ce n'est plus les maillons qui sont modifiés mais la tracé issu de *PhotoModeler*. Ce choix peut se justifier si la précision des maillons est supérieure à la précision du tracé de *PM*. C'est notamment le cas des grilles pour lesquels un changement de dimension, comme dans la solution précédente, peut être perceptible (illustration 48c).

La solution *A* présente un problème majeur car le maillon modifié est facilement perceptible dans un modèle où on peut se déplacer au niveau du sol. Les solutions *B* et *C* permettent un rendu beaucoup plus fidèle d'un point de vue visuel. Le choix entre ces deux possibilités doit se faire sur le critère de la précision. Il faut déterminer si la précision de l'acquisition du maillon (dimensions) est plus grande que celle du tracé (le segment issu de *PhotoModeler*).

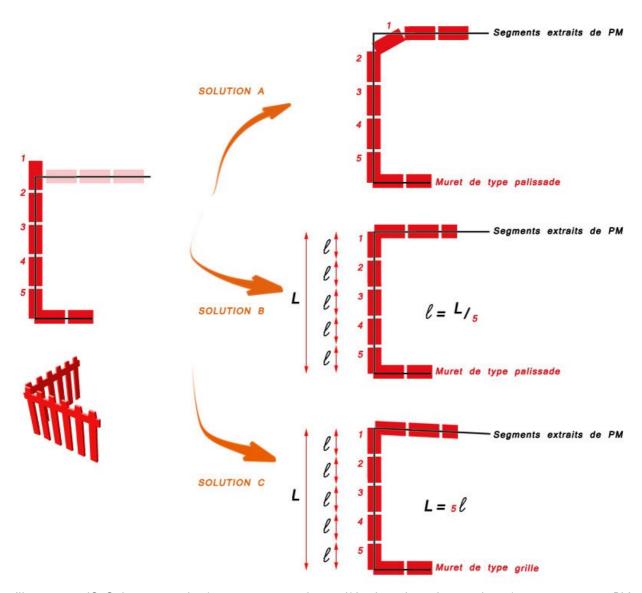


Illustration 48: Solutions explorées pour ajuster le modèle de palissade aux données acquises sur PM

6.3.2.4 Végétation.

L'acquisition et la restitution de la végétation présente sur le plan-relief de Toul représentent un enjeu différent de celui des bâtiments. La question de l'acquisition à été rapidement résolue car la quantité et la variété de végétation étudiée sont conséquentes ce qui rend inimaginable une opération d'acquisition par des outils classiques. Néanmoins, une partie de la végétation, celle qui de développe de manière linéaire, a pu être traitée de la même manière que les murets et palissades. Ainsi, il ne nous reste qu'à restituer la végétation ponctuelle (arbre) ou en réseau (vignes).

L'État des Dépenses, un des documents mis à disposition par le Musée des Plans-Reliefs, nous apprend que plus de 800 000 pieds de vignes sont présents sur l'ensemble du plan-relief de Toul (table de ville et tables de campagne). Y sont également référencés des arbres fruitiers, peupliers, saules étêtes, buissons à trois tiges, pieds de vignes, sapins, arbres forestiers à cinq tiges, quatre tiges, trois tiges et saules à hautes tiges.

Hormis pour les vignes, il s'avère laborieux de localiser ces typologies sur le plan-relief pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le chapitre 2.2. De nombreux éléments de végétation sont abimés, pliés ou manquants et, même si une partie de la végétation est localisée et identifiée selon la classification énoncée cidessus dans les cahiers de développement, on a établi précédemment leur manque de fiabilité.

L'observation directe de la maquette reste la meilleure solution pour restituer en 3D une végétation fidèle à celle du plan-relief. Cette opération est réalisée assez rapidement puisque l'essentielle de la végétation est présente sur la table de campagne ou au niveau des fortifications, des zones faciles d'accès. Ainsi, on identifie six grands types de végétation :

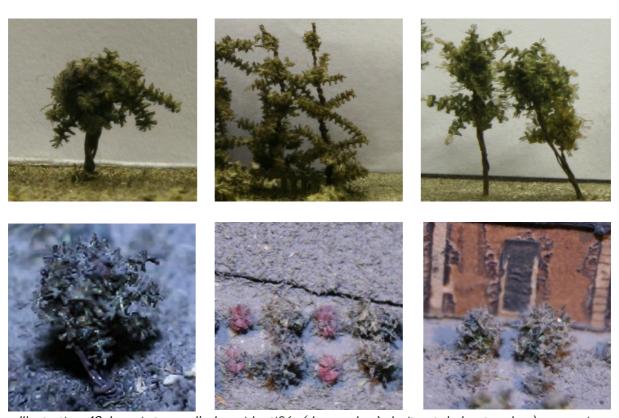


Illustration 49: Les six types d'arbres identifiés (de gauche à droite et de haut en bas) : pommier, sapin, arbre long, arbre au tronc court et deux types de buissons)

Chacun de ces types de végétation est modélisé en trois dimensions. *Plan-relief* permet ensuite de planter la végétation sur le MNT texturé avec la représentation de la table afin de faciliter la localisation de la végétation. L'utilisateur n'a plus qu'à pointer sur le MNT l'emplacement de l'arbre et à choisir son type. Pour les zone où la végétation se fait plus dense, comme c'est le cas des parcelles de vignes, on définit une zone sur la quelle est généré un réseau de points. Les intervalles entre les points de ce réseau et la régularité de leur alignement sont paramétrables de manière similaire aux haies (chapitre 6.3.2.3).

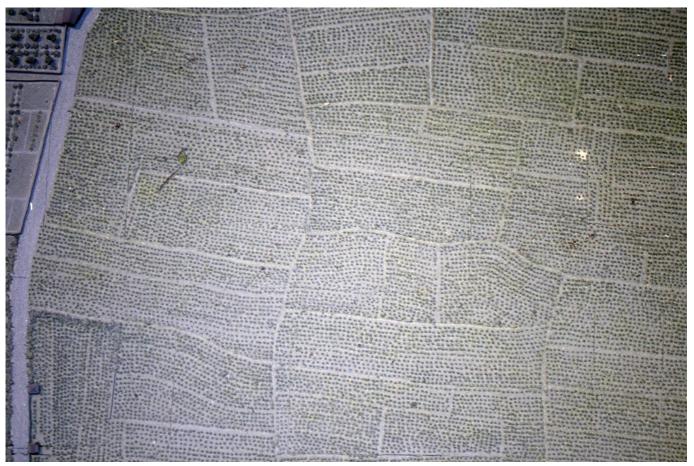
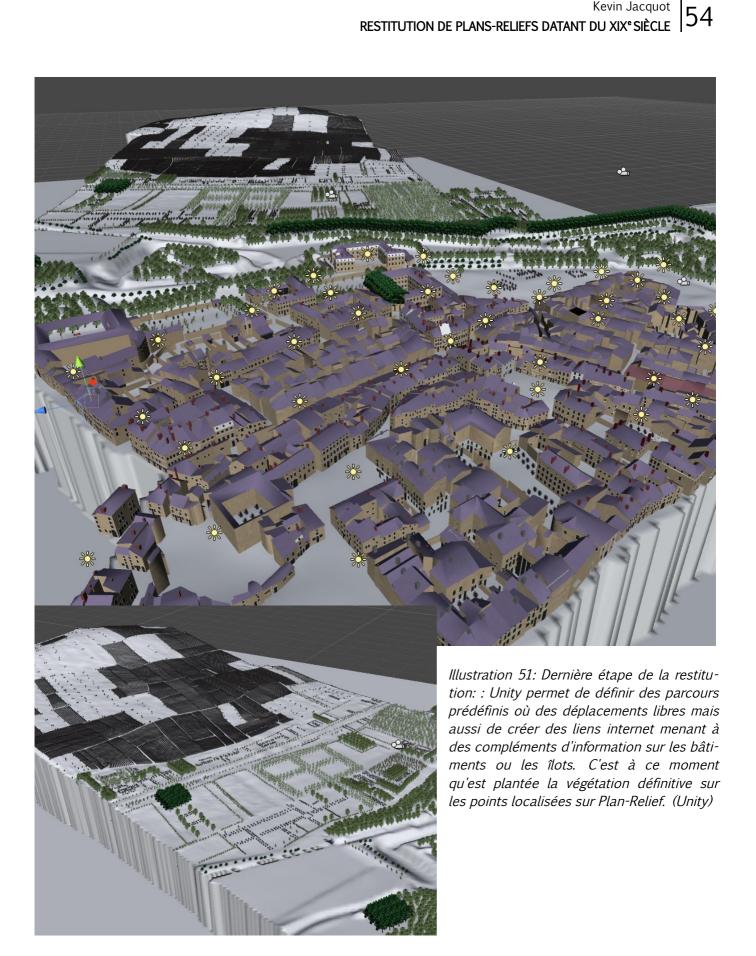


Illustration 50: Les parcelles de vignes sont autant de réseaux de points que l'on définit sur Plan-Relief

Après que la végétation ait été localisée sur *Plan-Relief* (le modèle 3D final de la végétation n'est mis en place que sur *Unity*), les bâtiments sont texturés sur *Maya*. Là aussi, les différentes textures ont été identifiées et localisées sur le modèle 3D lors de la reconstruction ce qui limite le temps passé à appliquer les textures finales sur *Maya*. *Unity* est le dernier maillon dans le processus de restitution du plan-relief (illustration 51).



9. TESTS DU LOGICIEL.

9.1 Limites.

La gestion des relations entre bâtiments mitoyens n'en est qu'à ces débuts. Le processus automatique de correction des alignements et du parallélisme (chapitre 6.2.4) à l'échelle de quelques bâtiments fonctionne relativement bien mais en présence d'une densité de construction trop grande, les corrections ont un taux de réussite moindre. C'est notamment le cas en cœur d'îlot, où les situations de mitoyenneté peuvent être assez nombreuses et complexes que le taux de réussite des corrections chute.

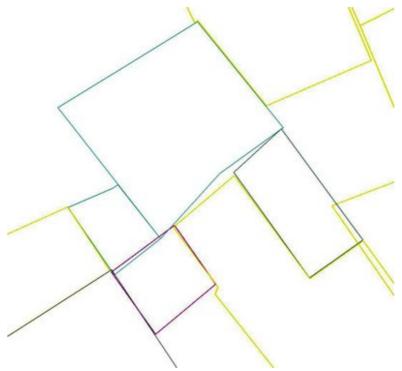
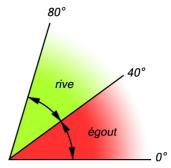


Illustration 52: Lorsque le nombre de construction augmente, les corrections de parallélisme perdent en efficacité (Plan-Relief)

Les algorithmes développés pour le projet ont une efficacité assez élevée mais dans certains cas, comme pour identifier les arêtes des lots de segments de toitures, le processus d'identification peut échouer. La première cause avancée est celle de la valeur des seuils (valeur angulaire) permettant d'identifier les arêtes. Dans certains cas, les toits ont des pentes trop faibles ce qui peut fausser l'identification.

Les rives sont identifiées par l'angle qu'elle forme avec l'axe horizontal. Si cet angle dépasse un certain seuil (40° dans notre exemple), l'arête est une rive. Mais si les pentes de la toiture sont trop faibles, car mal numérisées ou déformées par le temps, l'arête ne peut être identifiée correctement. Pour corriger ces erreurs, il faudrait étudier l'identité des arêtes contiguës (un égout n'est jamais relié à un faîtage par exemple).



De la même manière, les dimensions prédéfinies des objets paramétrés (fenêtres, cheminées, etc.) peuvent encore être affinées au regard des cas les plus couramment rencontrés sur le plan-relief. Néanmoins, un des problèmes majeurs dans la restitution du plan-relief apparaît au niveau des fenêtres. La restitution des objets se fait à vue, d'après les photographies et plus rarement grâce aux cahiers de développement lorsque la prise de photographies est impossible (intérieur d'îlot).

La conséquence est un décalage par rapport à la réalité car, les photos étant prise en plongée, les proportions sont déformées. Cette angle de vue nous permet de renseigner la plupart des façades. A de rares occasion, pour les îlots situés en périphérie, il est possible d'obtenir des clichés presque frontaux (illustration53b). L'utilisation des cahiers de développement restent, comme nous l'avons déjà établis, peu fiable. C'est un problème qu'on ne rencontre pas avec les cheminées puisque leurs dimensions sont suffisamment importantes pour qu'elles soit acquises par lasergrammétrie.





Illustration 53: Illustration du problème d'écrasement sur deux photos. Le cliché a est pris en plongée tandis que le b est quasiment frontal. Les proportions des fenêtres diffèrent to-talement.

Ce problème de restitution des fenêtres pose la question de l'échelle de représentation. L'illustration suivante rend compte des dimensions réelles de la maquette. Notre perception du plan-relief a tendance à être faussée par les photographies qui donnent l'illusion d'une échelle plus grande. Le plan-relief de Toul est une maquette au 1/600 tandis que son modèle numérique est une maquette virtuelle, donc sans échelle. Chose impossible avec le plan-relief : la maquette 3D offre la possibilité de se promener dans ses rues. Or, le niveau de détail du plan-relief et la précision des éléments qui y sont représentés ne permettent pas de restituer un environnement crédible.

En effet, le dimensionnement et le positionnement des fenêtres se font avec une précision maximum de l'ordre du demi-millimètre dans le meilleur des cas (illustration53). A l'échelle une, notre précision plafonne donc à trente centimètres. Mais en moyenne, le manque de précision est plutôt supérieur au millimètre ce qui entraine des décalages de l'ordre du mètre.

Une solution envisagée est donc de limiter les zones accessibles du modèle 3D en lui conférant les mêmes possibilités de points de vues que ceux d'un observateur face au plan-relief au 1/600. En définissant un volume englobant la maquette 3D dans lequel l'utilisateur ne peut se rendre, on lui interdit les positions qu'il ne peut avoir avec le plan-relief, notamment de se déplacer dans les rues et dans toutes les situations où les imprécisions sont visibles.



Illustration 54: L'échelle graphique (et le doigt) permet de se rendre compte des véritables dimensions de la maquette. Le détail illustre la finesse des chambranles* (jusqu'à 1/4 de millimètre environ) et les limites de la précision de la maquette (les baies font 3mm de large soit 1,80 mètre à échelle réelle. La hauteur peut être estimée à près de 5 mètres pour les portes et trois mètres pour les fenêtres!)

Les termes suivis d'un * sont illustrés (illustration 57) et définis dans le lexique.

9.2 Cas non développés.

De nombreux éléments ne sont pas encore traités dans *Plan-Relief*, faute de temps essentiellement. Ce sont généralement des objets dont la présence sur le plan-relief est rare et dont l'absence sur le modèle 3D n'est pas manifeste.

Le rendu des acrotères ou des balustrades pour les quelques cas de balcons ou de toitures terrasses n'est pas réalisé tout comme le rendu des chaînages d'angle qui ne ne concerne qu'une poignée de bâtiments. De la même manière, on trouve quelques fois, sur la table de ville et de campagne, des dénivelés traités en terrasses. Cependant, l'échelle de la maquette est telle qu'il est impossible de localiser précisément leur emplacement par capteurs 3D. L'acquisition par photographies restent la meilleure option même si elle n'a pas été effectuée.

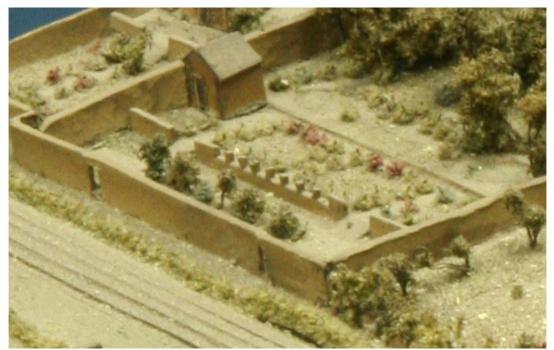


Illustration 55: Terrasses, pentes, escalier (au niveau des ouvertures des murs) restent difficiles à acquérir.

Rappelons aussi que les bâtiments à la volumétrie complexe, comme la Collégiale Saint-Gengoult sont en dehors du processus de restitution mis en œuvre d'après la méthode présentée dans le chapitre 4. Ils sont modélisés de manière traditionnelle sur des logiciels comme *Maya* ou *3DS*. Enfin, même si la végétation est restituée, seule la localisation est effectuée sur *Plan-Relief*. Par conséquent, l'utilisation d'un logiciel tiers est nécessaire ce qui multiplie les outils nécessaires au projet.

10. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.

10-1 Conclusion

Le travail présenté dans ce document a pour objectif de rendre compte de la réflexion et des travaux effectués pour parvenir à restituer en trois dimensions le plan-relief de Toul. Nous avons montré que ce projet de numérisation pose des questions qui sont propres à l'objet étudié et qu'on ne retrouve pas forcément dans des travaux de numérisation d'objets grandeur réelle.

A l'instar d'un projet à échelle réelle, le choix des outils d'acquisition est déterminant puisque c'est le premier maillon dans la chaîne visant à la restitution 3D. Des données qu'il va générer va dépendre l'ensemble du projet. L'exécution de cette étape est largement perfectible. Mais, de par ses dimensions, son état de conservation, son échelle et les mesures de protection mise en œuvre, le plan-relief (et sa numérisation) est un projet plus complexe.

Un certain nombre de limites et de contraintes ont été établies au fur et à mesure de l'expérimentation, aussi bien au niveau du logiciel développé mais aussi au niveau de la méthode elle-même. Bien que notre méthode est proche de celle du projet de numérisation de la maquette de Prague, nous parvenons à obtenir des résultats comparables sans bénéficier des lourds moyens engagés par l'équipe tchèque. Les possibilités pour améliorer notre méthode sont nombreuses et nous permettent à terme, d'envisager la validation de notre méthode à différentes échelles, que cela soit à celle du plan-relief complet de Toul ou à celles d'autres plans-reliefs.

Enfin, la question sous-jacente soulevée par le problème du rendu des objets de type fenêtres (chapitre 9.1) porte sur la notion d'échelle. Le modèle 3D est une représentation tridimensionnelle d'une maquette au 1/600 en conséquence de quoi sa consultation doit se faire à une échelle équivalente. A chaque échelle sont attachés des jeux de données particuliers. Pour permettre des déplacements dans les rues virtuelles du planrelief afin d'accéder aux informations relatives à des bâtiments, il est nécessaire de changer d'échelle pour passer d'une problématique de localisation à une problématique de compréhension de l'objet.

10-2 Perspectives

De nombreuses pistes sont à explorer pour améliorer la méthode développée pour la numérisation du plan-relief de Toul. Dans l'état actuel de la méthode, et comme mentionné au début de ce mémoire, la phase d'acquisition est l'un des principaux maillons dans le processus de restitution.

L'acquisition photogrammétrique par *PhotoModeler* peut être améliorer en tenant compte, une fois sur *Plan-Relief*, de l'indice de précision *maximum residual*. En mettant à profit cet indice au moment des corrections automatiques, on peut diminuer le temps passer aux ultimes ajustements manuels. Dans le chapitre 6.2.4, quand on décide si des segments de toitures voisines doivent être superposés, l'indice de précision peut aider à déterminer lequel des segments doit être déplacé (celui ayant le *maximum residual* le plus élevé : le moins précis). De la même manière lorsqu'on contraint un faîtage à l'horizontalité, celui des deux points de l'arête de type faîtage ayant la précision la plus basse sera ramené à l'altitude du point ayant le *maximum residual* le plus

bas. Dernier exemple, lorsqu'il s'agit de choisir quelles solutions choisir entre la B et la C pour la restitution des murets (chapitre 6.3.2.3.), le *maximum residual* du tracé, s'il devait dépasser un seuil, pourrait favoriser la dernière solution. Il s'agit ici de corriger les données acquises par PM sur Plan-Relief en mettant à profit certains de ces atouts comme l'indice de précision.

Le véritable enjeu porte sur l'automatisation des processus qu'on mène encore manuellement et, même si automatiser la reconstruction d'une scène en objets paramétriques est encore impossible, les points suivants énoncent quelques prolongements permettant d'optimiser le processus en réduisant les phases où l'action humaine est nécessaire.

La mise en place des textures a deux défauts puisqu'elle nécessite le passage sur un logiciel supplémentaire pour l'application des textures qui est réalisée de manière manuelle. Pour optimiser cet étape, il suffit d'implémenter la mise en place des textures définitives sur le logiciel *Plan-Relief* car ce dernier permet déjà d'identifier une texture pour chacune des facettes.

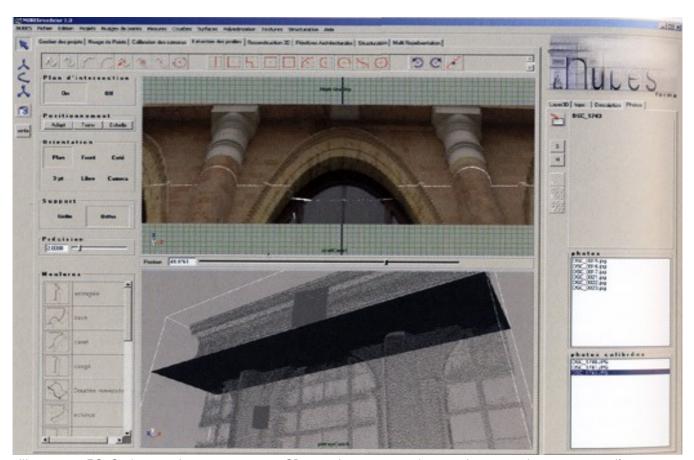


Illustration 56: Opération de reconstruction 3D avec le support métrique du nuage de points pour l'extraction de points et le support visuel de la photographie pour l'interprétation des formes dans Nubes Forma (UMR CNRS/MCC694 MAP-Gamsau)

Dans notre projet, l'utilisation des données acquises par lasergrammétrie se borne à l'obtention du modèle numérique de terrain et à aider au positionnement et au dimensionnement des cheminées. De nombreux travaux existent sur l'association de lasergrammétrie et de la photogrammétrie pour faciliter l'obtention de modèles 3D. Par exemple, on peut évidemment penser à profiter du MNE pour ajuster automatiquement la planéité des toits. L'intérêt de ce rapprochement est de pouvoir exploiter la complémentarité des données et de pouvoir substituer une information géométrique acquise par une technique par une autre [LUC06].

La plupart des travaux en cours cherche à segmenter les nuages de points acquis par capteurs laser (ou par photogrammétrie). Par segmentation, on entend la qualification d'un jeu de mesures dans un nuage de points. Les points avec les mêmes qualités doivent répondre à certaines exigences (distance, couleur, direction de la normale, etc.). Plusieurs algorithmes existent et leur façon de mener la segmentation diffère). On peut citer deux grandes familles de segmentation, celle basée sur le principe de fusion et celle basée sur la reconnaissance de formes géométriques. Le premier cherche à améliorer la qualité des arêtes et des surfaces acquises dans les maillages issus de nuages de points [SED09], [HOP09], [BAR09], mais la quantité de données reste importante. Les primitives géométriques ne sont ni isolées (un seul maillage pour tous les objets) et ni identifiées (cubes, cylindre, etc. sont composés de centaine de points). La seconde famille regroupe les technique de reconnaissance de formes, comme les plans de toitures. On cherche à décomposer du nuage de points en un ensemble de segments plans [BOU10], [VOS09], [ROT05].

Cependant, des recherches dans lesquelles entrent en jeu capteurs laser et traitements d'images tendent à associer les données acquises par ces deux outils avant de procéder à la segmentation [ALS04]. Ce prétraitement permet d'affiner le nuage de points en y incorporant les arêtes vives obtenues par photogrammétrie. La segmentation est alors facilitée.

Pour en finir avec les capteurs tridimensionnels, on peut penser à l'acquisition des textures par capteurs laser puisque certains dispositifs de balayage permettent aussi d'acquérir les valeurs d'intensité (valeur exprimant la réponse du matériau au faisceau laser dans une nuance de 255 niveaux de gris) et les valeurs colorimétriques (valeurs RVB extraites à partir d'une caméra calibrée embarquée dans le module de balayage) ce qui permettrait de gérer le problème des fenêtres (avec une résolution suffisamment élevée), des textures et du rendu des couleurs réelles de la maquette [LUC06] une fois le plan-relief nettoyé.

Enfin, l'idée d'éprouver la méthode développée pour un plan-relief au 1/600 sur une ville réelle avec des données issues de photographies aériennes et de capteur laser à temps de vol permettrait de passer outre les problèmes d'éclairage, de poussière et d'échelle et de juger de la véritable efficacité de cette méthode.

12. LEXIQUE.

Arase - Face supérieure d'un mur correctement mise de niveau.

Arêtier - Arête résultant de l'intersection de deux versants de toiture formant un angle saillant.

Avant-toit - Partie du toit faisant saillie sur la façade d'une construction.

Brisis - Pan inférieur, presque vertical, d'un comble à la Mansart.

Chambranles - Encadrement fixe (ou dormant) d'une porte ou d'une fenêtre, monte en applique ou dans une feuillure de la paroi.

Chien-assis - Petite lucarne dont le toit a une pente opposée a celle de la toiture.

Créneaux - Dentelure pratiquée au sommet d'un mur, d'un parapet, etc., et faisant partie d'un ensemble d'horizontales, alternativement hautes et basses, raccordées par des verticales, formant des pleins et des vides.

Égout ou rive d'égout - Limite inférieure d'un versant de toiture .

Faîtage ou faît - Au sommet d'une toiture, intersection horizontale de deux versants dont les pentes sont opposées.

Goutterau - Mur situé sous l'égout d'un pan de toiture.

Haie vive - Clôture faite de végétaux vivants

Ligne de Bris - Arête horizontale marquant la rupture de pente entre les deux pans d'un comble a la Mansart.

Long pan ou versant - Façade ou versant de toiture le plus long d'un bâtiment.

Lucarne - Ouverture en saillie sur une toiture inclinée, équipée d'une croisée ou d'un châssis dispose verticalement

Mur haut - Le mur du côté du faîte d'un appentis est appelé le mur haut.

Noue - Ligne d'intersection de deux pans de toiture formant un angle rentrant.

Palissade - Ensemble compose de palis ou piquets, et de planches ou panneaux jointifs, destine a entourer une propriété.

Paroi - Écran séparatif entre deux milieux (deux locaux, un local et l'extérieur).

Pignon - Mur perpendiculaire au faitage d'un bâtiment a toiture a deux pans.

Poinçon - Point de rencontre de deux arêtiers ou du faitage avec un ou des arêtiers.

Rive de tête - Ligne à la partie haute d'un seul pan de couverture.

Rives latérales - Lignes qui limitent les côtés de couverture.

Saillies de rives - Saillies d'un toit sur les rives

Terrassons - Versant le plus plat d'un toit à la Entre le faîtage et le brisis.

Toit en appentis - Le toit à un pan est la forme la plus simple.

Toit en bâtière - toit à deux versants inclinés formant les côtés d'un bât et posé entre deux murs pignons.

Toit en croupe - La croupe est la partie du toit qui, côté du pignon, est triangulaire en un pan ou en deux pans dont un est un triangle et l'autre un trapèze.

Toit en croupe à la Mansart - Une toiture est en croupe à la Mansart lorsqu'elle présente deux pentes différentes sur le même versant sur ses quatre pans. Le brisis est le pan inférieur de la toiture mansardée. Le

pan supérieur se nomme le terrasson.

Toit à demi-croupe - Si le pan triangulaire est seul et ne va pas aussi bas que les versants principaux, il s'agit d'une demi-croupe.

Toit à la Mansart - Une toiture est dite mansardée lorsqu'elle présente deux pentes différentes sur le même versant. Le brisis est le pan inférieur de la toiture mansardée. Le pan supérieur se nomme le terrasson.

Toit en dôme - La toiture qui est en voûte sphérique maçonnée est appelée un dôme.

Toit en flèche - La toiture qui est conique ou à facettes pointues est une flèche.

Toit en pavillon - Toit à quatre versants droits couvrant un corps de bâtiment de plan sensiblement carré.

Venelle - Passage étroit entre deux bâtiments voisins.

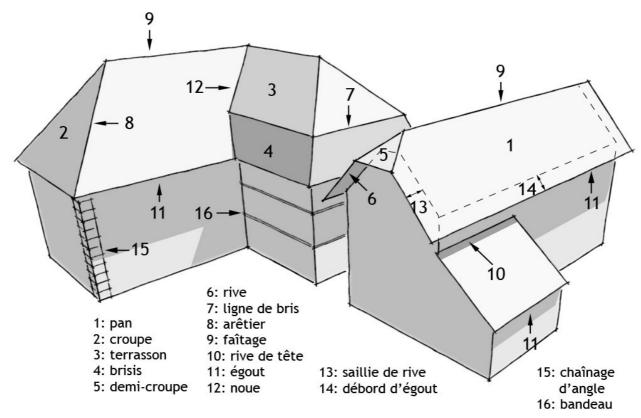


Illustration 57: Vocabulaire illustré

13. BIBLIOGRAPHIE.

Ouvrages

[LUC09] LUCA, L., *La photo modélisation architecturale : Relevé, modélisation, représentation d'édifice à partir de photographies.* Paris : Éditions Eyrolles, 2009. 263 p.

[FAU07] FAUCHERRE, N., MONSAINGEON, G., ROUX, A., Les plans en relief des places du Roy. Paris : Éditions du Patrimoine, 2007. 176 p.

[MAN90] MANNES, W., *Toits & charpentes en bois : Géométrie appliquée, dessin des toits, dessin des charpentes.* Paris : Éditions Eyrolles, 1990. 128 p.

[VIG96] VIGNAN, J., *Dicobat 1996 : dictionnaire général du bâtiment*. Rig-Orangis : Éditions Arcature, 1996. 1117 p.

[VIO78] VIOLLET-LE-DUC, E., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du Xf au XVf siècle.* Saint Julien : Édition de Sancey, 1978.

[WAR97] WARMOES, I., Le Musée des plans-reliefs. Paris : Éditions du Patrimoine, 1997. 64 p.

Articles

[ALB09] ALBY E., SMIGIEL, E., ASSALI, P., GRUSSENMEYER, P., KAUFFMANN-SMIGIEL, I., Low Cost Solutions for Dense Point Clouds of Small Objects: PhotoModeler Scanner vs. David Lasercapteur, in: 22nd CIPA Symposium, 11 et 15 Octobre 2009, Kyoto, Japon

[ALS04] ALSHAWABKEH, Y. et HAALA, N., *Integration of digital photogrammetry laser scanning for heritage do-cumentation*. In ISPRS, volume 35, 2004. pp. 593–598.

[BAR09] BARAZZETTI, L., REMONDINO, F., SCAIONI, M. *Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects.* Videometrics, Range Imaging and Applications X, Proc. of SPIE Optics+Photonics, Vol. 7447, 2-3 août 2009. San Diego, Californie, Etats-Unis.

[CHE09a] CHEVRIER, C., PERRIN, J.P., *Generation of architectural parametric components : cultural heritage 3D modelling*, CAAD futures 09 - Joindre langages, cultures et visions, 17-18-19 juin 2009, Montréal, Canada

[CHE09b] CHEVRIER, C., CHARBONNEAU, N., GRUSSENMEYER, P, PERRIN, J.P., Élaboration *de nouvelles configurations à partir de cas existants du patrimoine bâti. Conception architecturale paramétrique*, SCAN'09, 14-15 mai 2009, Nancy, France

[DYL09] DYLLA, K., FRISCHER, B., MULLER, P., ULMER, A., HAEGLER, S., *Rome Reborn 2.0: A Case Study of Virtual City Reconstruction Using Procedural Modeling Techniques*, in CAA 2009. Making History Interactive. 37th Proceedings of the CAA Conference 22-26 Mars 2009, Williamsburg, Virginie, Etats-Unis.

[GUI05] GUIDI, G., FRISCHER, B., De SIMONE, M., CIOCI, A., SPINETTI, A., CAROSSO, L., LOREDANA MICOLI, L., RUSSO, M., GRASSO, T., *Virtualizing Ancient Rome: 3D Acquisition and Modeling of a Large Plaster-of-Paris Model of Imperial Rome*," *Videometrics VIII*, 18-20 Janvier 2005, San Jose, Californie, Etats-Unis.

[HOP09] HOPPE, C. et KRÖMKER, S. Adaptive meshing and detailreduction of 3D-point clouds from laser scans.

proceedings of ISPRS Workshop 3D ARCH 2009, 25-28 février 2009, Trente, Italie.

[KOE07] KOEHL, M. et DARWISH, O. *Construction et intégration de maquettes 3D dans un SIG*, in: Conférences SIG 2007, Versailles, France.

[MUL06] MULLER, P., WONKA, P., HAEGLER, S., ULMER, A., VAN GOOL, L., *Procedural Modeling of Buildings*, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 / ACM Transactions on Graphics.

[ROT05] ROTTENSTEINER, F., TRINDER, J., CLODE, S. et KUBIK, K. *Automated delineation of roof planes from LiDAR data*, ISPRS Workshop Laser scanning 2005, Enschede, Pays-Bas.

[SED09] SEDLACEK, D. et ZARA, J. *Graph Cut Based Point-Cloud Segmentation for Polygonal Reconstruction*. In Proceedings of the 5th international Symposium on Advances in Visual Computing: Part II, 2009, Las Vegas, Nevada, États-Unis.

[VAL10] VALLET, B., PIERROT-DESSEILLIGNY, D., BREDIF, M., Boldo, M., *Amélioration d'une base de données d'empreintes de bâtiments pour la reconstruction 3D : une approche par découpe fusion*, in: Actes du 17ème congrès francophone de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA), Janvier 2010, Caen, France.

[VOSO1] VOSSELMAN, G. et DIJKMAN, S. *3D building model reconstruction from point clouds and ground plans.* International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol 34, part 3/W4, 22-24 Octobre 2001, Annapolis, MA, États-Unis, pp. 37-44.

[ZHU09] ZHU, L., MA, G., MU, Y., SHI, R., *Reconstruction 3D-Models of Old Beijing City by Structured Light Scanning*, in: 22nd CIPA Symposium, 11 et 15 Octobre 2009, Kyoto, Japon

[ZLA98] ZLATANOVA S., PILOUK M., et TEMPFLI K., *3D Object reconstruction from aerial stereo images.* in: Proceeding of the 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization, Plzen, Czech Republic, Vol. III 9-13 Février 1998, pp. 472-478.

Thèses

[ALB06] ALBY, E., Contribution à l'élaboration d'une méthodologie de relevé d'objets architecturaux basée sur la combinaison de techniques d'acquisition, Thèse en science de l'architecture, Nancy 1, novembre 2006, 304 p.

[BOU10] BOULAASSAL, H., Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres, Thèse en topographie – géomatique, Université de Strasbourg, 2010, 214 p.

[CHA00] CHAINE, R., Segmentation d'ensembles non organisés de points 3D d'une surface : propagation anisotrope d'étiquettes basée sur les graphes, Thèse en informatique, Lyon 1, 2000, 156 p.

[FUC06] FUCHS, A., *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique*, Thèse en science de l'architecture, Nancy 1, novembre 2006, 260 p.

[LUC06] LUCA, L., *Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural*, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers centre d'Aix en Provence, mars 2006, 217 p.

[GAV98] GAVA, D., *Vision conoscopique 3D : calibration et reconstruction*, Thèse en informatique et mathématique, Université René Descartes, Paris, juin 1998, 156 p

[PER06] PERRET, J., *Modélisation d'environnements urbains virtuels*, Thèse en informatique, Université de Rennes, Rennes, 2006, 160 p.

Webographie

Autodesk (3DS, Maya, Autocad, ImageModeler): http://www.autodesk.fr/

Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales : http://www.cnrtl.fr/definition/

Center for Photogrammetric Training, History of Photogrammetry:

http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/sure340/notes/History.pdf

Dictionnaire professionnel du BTP:

http://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP

Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^é siècle :

http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle

École Polytechnique :

http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Jean-Jacques.Levy/00/pc10/a10.pdf

Geomagic: http://www.geomagic.com

Langweilův Model Prahy: http://www.langweil.cz

Leica: http://www.leica-geosystems.com

Mesure, relevé et représentation de l'objet culturel :

http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/methodes/mesu_obj.htm

Musée des Plans-Reliefs : http://www.museedesplansreliefs.culture.fr

Patrimoine Numérique, Catalogue des collections numérisées : http://www.numerique.culture.fr

Projet Rome Reborn : http://www.romereborn.virginia.edu/

PhotoModeler: http://www.photomodeler.com

Unity: http://unity3d.com/

14. TABLES DES FIGURES.

Illustration 1: Le plan-relief de la Citadelle de Briançon5
Illustration 2: Une partie représentative du plan-relief de Toul6
Illustration 3: Une collection importante, sous-exploitée et fragile. (www.museedesplansreliefs.culture.fr)7
Illustration 4: décollements, coulures, poussière : un échantillon des altérations subies par la maquette9
Illustration 5: Tableau non exhaustif des techniques d'acquisition 3D11
Illustration 6: Principe de la restitution à partir d'un couple d'images et d'un bloc multi-images [LUC06]13
Illustration 7: Variation des paramètres de la moulure (profil, forme et hauteur) [CHE09b]14
Illustration 8: Trompe l'œil sur le plan-relief de Prague et acquisition manuelle de points caractéristiques (www.langweil.cz)
Illustration 9: Le maillage corrigé issu de la numérisation laser et différents types de volumes utilisé sur CityEngine [GUI05]16
Illustration 10: tableau comparatif de différents projet de numérisation de maquettes17
Illustration 11: Les différentes parties assemblées de l'îlot 23 (Geomagic)18
Illustration 12: PhotoModeler Scanner et le rendu 3D par stéréophotographie de deux couples stéréos19
Illustration 13: Détail du nuage de points sur une partie de la ville (PMS)19
Illustration 14: Arêtes des toitures retrouvées sur PhotoModeler20
Illustration 15: Des lots d'arêtes en doublon20
Illustration 16: Reconstruction polyédrique sur ImageModeler21
Illustration 17: L'îlot 46 : plan de toiture et une partie des élévations21
Illustration 18: Détail sur la méthode de reconstruction automatique des parois des bâtiments sur Plan-Relief. 24
Illustration 19: Interface de Unity24
Illustration 20: Récapitulatif des opérations nécessaires à la restitution et à la visualisation du plan-relief de Toul
Illustration 21: Numérisation par capteur 3D du plan-relief de Toul26
Illustration 22: Le centre des îlots peut être encombré de nombreux bâtiments ce qui rend difficile l'identification du type des toitures et presque impossible de déterminer la présence ou non d'ouvertures27
Illustration 23: L'îlot 23 sur PhotoModeler prêt à être exporter vers Plan-Relief (PM)28
Illustration 24: Une partie des fortifications présente sur le plan-relief29
Illustration 25: MNE et MNT sur la partie du plan-relief étudiée30
Illustration 26: Tableau de référencement des typologies établis au début du projet. A gauche : les toitures complexes. A droite : les toitures simples classées par types avec les variations pour chacune d'elle au niveau du plan (en L, T, U ou à cours), de la coupe ou de la division (longitudinale, transversale, quartier, etc.) et des cas irréguliers mais apparentés
Illustration 27: Positionnent des segments sur le modèle numérique d'élévation. (Plan-Relief)33

Illustration 28: Suite de segments assimilée à un seul toit complexe dans l'îlot 42 sur Plan-Relief et les toits correspondant sur la maquette. (Plan-Relief)3.
Illustration 29: L'enveloppe englobante peut être concave ou convexe34
Illustration 30: Principe de la Marche de Jarvis3
Illustration 31: Rives se chevauchant : le tracé en noir montre le parcours de l'algorithme, en rouge le parcours attendu30
lllustration 32: en rouge, les segments de type contour (C) formant le polygone englobant30
Illustration 33: Schéma synthétisant le processus d'identification. A chaque niveau, on précise l'identité de chacune des arêtes d'une toiture
Illustration 34: En vert, les segments de type arêtier et noue (AN) et en noir, les segments de type faîtage et ligne de bris (FLB)38
Illustration 35: en bleu, les segments de type rive (R)
Illustration 36: en violet les arêtes de type égout de croupe (EdC), en orange, les arêtes de type rive de tête (RT et en cyan, les égouts (E)4.
Illustration 37: en jaune, les arêtes de type ligne de bris (LB)4.
Illustration 38: La correction du parallélisme de segments voisins : le cas des rives est significatif42
Illustration 39: Segments mis parallèle ou superposés (en vert : recouvrement)42
Illustration 40: cas a : seul le toit supérieur à un débord. Cas b : les débords sont raccourcis d'une valeur égale à la moitié du recouvrement. (en vert : recouvrement)4.
Illustration 41: Résultat de la correction automatique sur une partie de l'îlot 33. Les mitoyennetés sont corrigées ce qui peut entrainer des problèmes au niveau des venelles*. (vues de toitures) (Plan-Relief)4
Illustration 42: Interface pour les ajustements possibles sur une toiture : faîtages horizontaux, pans plans, alignement des rives contiguës, rives parallèles, parallélisme des faîtages et des lignes de bris, des égouts aux faîtages, des égouts aux lignes de bris, des lignes de bris aux égouts et des faîtages aux égouts. (Plan-Relief)4:
Illustration 43: La porte cochère ou l'oculus sont deux des types implémentés40
Illustration 44: Ces deux cas illustrent les possibilités de placement offertes par l'interface : distribuer horizontalement, verticalement, enlever un élément d'une distribution ou hériter des dimensions de la parois. (Plan-Relief)40
Illustration 45: Les différents cas de positionnement des cheminées. Les trois exemples ci-dessus (a,b,c,) montrent des interactions plus complexes avec le modèle de bâtiment. Pour le cas d, on détourne l'objet bandeau4.
lllustration 46: Les cheminées sont suffisamment visibles sur le MNE pour être utilisées dans les positionner et les dimensionner (Plan-Relief)48
Illustration 47: haie vive*, haie vive* régulière, muret mixte, muret à créneaux*, muret simple, palissade* et grille sont les sept types de murets référencés49
Illustration 48: Solutions explorées pour ajuster le modèle de palissade aux données acquises sur PM5.
Illustration 49: Les six types d'arbres identifiés (de gauche à droite et de haut en bas) : pommier, sapin, arbre long, arbre au tronc court et deux types de buissons)52

RESTITUTION DE PLANS-RELIEFS DATANT DU XIX SIÈCLE 69

Illustration 50: Les parcelles de vignes sont autant de réseaux de points que l'on définit sur Plan-Relief53
Illustration 51: Dernière étape de la restitution: : Unity permet de définir des parcours prédéfinis où des déplacements libres mais aussi de créer des liens internet menant à des compléments d'information sur les bâtiments ou les îlots. C'est à ce moment qu'est plantée la végétation définitive sur les points localisées sur Plan-Relief. (Unity)
Illustration 52: Lorsque le nombre de construction augmente, les corrections de parallélisme perdent en efficacité (Plan-Relief)
Illustration 53: Illustration du problème d'écrasement sur deux photos. Le cliché a est pris en plongée tandis que le b est quasiment frontal. Les proportions des fenêtres diffèrent totalement56
Illustration 54: L'échelle graphique (et le doigt) permet de se rendre compte des véritables dimensions de la maquette. Le détail illustre la finesse des chambranles* (jusqu'à 1/4 de millimètre environ) et les limites de la précision de la maquette (les baies font 3mm de large soit 1,80 mètre à échelle réelle. La hauteur peut être estimée à près de 5 mètres pour les portes et trois mètres pour les fenêtres!)
Illustration 55: Terrasses, pentes, escalier (au niveau des ouvertures des murs) restent difficiles à acquérir58
Illustration 56: Opération de reconstruction 3D avec le support métrique du nuage de points pour l'extraction de points et le support visuel de la photographie pour l'interprétation des formes dans Nubes Forma (UMR CNRS/MCC694 MAP-Gamsau)60
Illustration 57: Vocabulaire illustré