

Sommaire

1.1. Introduction, contexte de la recherche.....	3
1.2. Problématique et objectifs	3
2. Etat de l'Art.....	5
2.1. Outils et techniques pour l'acquisition :	5
2.1.1. L'acquisition par scanner laser 3D.....	5
2.1.2. La restitution photogrammétrique.....	6
2.2. Outils et techniques pour la modélisation :	7
2.2.1. Modèle paramétrique pour la reconstruction automatique en 3d de zones urbaines denses à partir d'images satellitaires haute résolution	7
2.2.2. Modélisation Procédurale de Constructions(Bâtiments), Procedural Modeling of Buildings	9
2.2.3. Quelles technologies utiliser pour l'implémentation de la modélisation des données architecturales ?	10
2.2.4. Modélisation paramétrique à l'aide du GOP :	11
2.3. Conclusion:	12
3. Contexte de l'étude	13
A. LA TOITURE, introduction	13
B. Toitures simples :	15
I. TOITURE PLATE	16
II. TOIT EN PENTE:	16
II .1. Introduction	16
II.2. Faitage :	20
II.2.1. Faitage point :	20
II.2.2. Faitage ligne :	21
II.2.3. Faitage forme :	23
II.2.3.1. Forme identique:.....	23
II.2.3.2. Forme différente:.....	24
II.2.4. Bilan :	24

II.3. Forme de la base :	25	
II.3.1 Quadrilatère:	25	2
II.3.2. plus que 4 cotés :	26	
III. TOIT à Surfaces de révolution.....	30	
VI. TOIT à Surfaces d'extrusion.....	30	
V. TOIT à Surfaces gauches.....	31	
C. Toitures composées :	32	
Bibliographie.....	34	
Tables des figures	35	

Introduction, contexte de la recherche

L'évolution de la représentation architecturale et le besoin de la faciliter, ont stimulé depuis quelques années le développement et l'implémentation de nombreux logiciels de conception assistée par ordinateur **CAO** pour l'architecture.

Par ailleurs, l'acquisition des données spatiales en architecture a connu des progrès significatifs grâce à l'introduction de nouveaux instruments de mesure. Parallèlement, des techniques de traitements tridimensionnels (segmentation du nuage de points, maillage automatique, cartes de profondeur, modélisation paramétrique, photo-modélisation, etc.) permettent d'obtenir des supports d'analyse de l'objet à différents niveaux de détail et pour différentes finalités. Cependant, dès les premières étapes de traitement des données acquises, les problèmes de représentation s'imposent, car la démarche de reconstruction tridimensionnelle nécessite des interprétations géométriques pour décrire les objets architecturaux.

Le laboratoire CRAI, où j'ai effectué mon stage, conduit des travaux de recherche fondamentaux et appliqués dans le domaine des modèles, de la simulation d'ouvrages, des méthodes et outils informatiques relatifs à la conception architecturale, urbaine et technique. » [www.crai.archi.fr]

Dans cette vision, et pour la nécessité de se doter d'outils de représentation efficaces et fiables pour la reconstruction tridimensionnelle, le laboratoire développe le logiciel **G.O.P**¹ qui permet de faciliter la modélisation et d'ajuster les éléments aux données acquises pour les architectes, les urbanistes...

Dans ce travail, on collabore à fournir une approche permettant de conduire les opérations de reconstruction 3D d'un élément architectural bien déterminé en faisant référence à un ensemble de connaissances historiques et techniques.

Dans ce cadre, une approche de structuration spatiale et architecturale de l'élément a été développée pour effectuer une classification adéquate. Cette dernière ainsi structurée devient alors le support privilégié de navigation pour identifier son paramétrage. Les paramètres constituant l'élément architectural peuvent être gérés de manière dynamique en fonction de différents points de vue utilisateurs.

Problématique et objectifs

-Reconstruction tridimensionnelle et outils

-Objectif: Étude géométrique d'un élément architectural « la toiture »

-Recenser les différentes formes géométriques afin de déterminer les paramètres et les algorithmes nécessaires à la future modélisation 3D

¹ GOP : Génération d'Objets Paramétrés: c'est un ensemble de plug-in développé par le C.R.A.I pour « Maya ».

Aujourd'hui, les outils numériques d'acquisition, de traitement voire du rendu ne font pas seulement penser à ce qu'on conçoit comme modèle final. On réfléchit également aux outils mêmes et aux processus de modélisation qui sont à l'origine de ces éléments conçus. On réfléchit au comment faire vite et aux utilisations de ces éléments dans la reconstruction tridimensionnelle des édifices patrimoniaux.

L'objectif général de ce travail est de spécifier les paramètres et les méthodes permettant la modélisation de l'élément architectural « toiture » pour faciliter par la suite la reconstruction tridimensionnelle des édifices patrimoniaux.

Ainsi, par le biais de ce travail, on effectue une analyse générale de l'élément architectural spécifique (la toiture) et on propose des méthodologies de modélisation à cette typologie préalablement définie.

Pour la modélisation géométrique, il s'agira d'abord de déterminer les éléments géométriques composant la toiture et de définir des procédures appropriées pour leur reconstruction. Dans le cas spécifique des éléments typés (arrêtes, faitage, moulures, etc.) il s'agira entre autre, à partir d'une analyse des traités d'architecture, d'en extraire des règles, de les formaliser et d'en faire une traduction numérique exploitable dans le but de conduire la modélisation par une procédure de primitives architecturales

Le but alors est de parvenir à mettre en œuvre; en s'appuyant sur l'analyse et l'étude de l'élément architectural «les toitures»; la méthode de modélisation en 3D ainsi que l'implémentation sur GOP à partir des paramètres identifiés.

« A ce moment, Kublai Khan l'interrompait ou bien imaginait de l'interrompre, ou encore Marco Polo imaginait qu'il était interrompu, par une question du genre :
Est-ce que tu avances toujours avec la tête tournée en arrière? »
Italo Calvino, Les villes invisibles, Turin 1972 [Ital74]

Les recherches sur la modélisation informatique des données architecturales ont fait l'objet de plusieurs travaux durant ces dernières années.

Et dans le cadre de développement d'une approche facilitant la reconstruction 3D et la modélisation des édifices architecturaux, nous étions dans l'obligation d'analyser ses divers travaux et de ressortir les lignes directrices de notre recherche.

Nous allons présenter en bref quelques outils d'acquisition pour montrer la nécessité des outils de reconstruction et de modélisation. En deuxième lieu, nous allons étudier quelques travaux de recherches qui s'intéressent à la modélisation paramétrique.

2.1. Outils et techniques pour l'acquisition :

2.1.1. L'acquisition par scanner laser 3D

Le principe de mesure des distances à l'aide d'un laser déclenché consiste à émettre vers l'objet à mesurer une impulsion lumineuse très courte. Une partie de la lumière est diffusée par l'objet et revient donc vers le point d'émission où elle est recueillie. [FUCOG]

Le balayage laser terrestre est « utilisation d'un dispositif basé au sol, qui utilise un laser pour mesurer les coordonnées tridimensionnelles d'une région donnée de la surface d'un objet de façon automatique, dans un ordre systématique et à un taux élevé de vitesse, près du temps réel » [Boehler et al. 2002a].

Après l'acquisition de ces données, leurs traitements seront soit semi-automatiques (voir fig. E1) soit manuels.

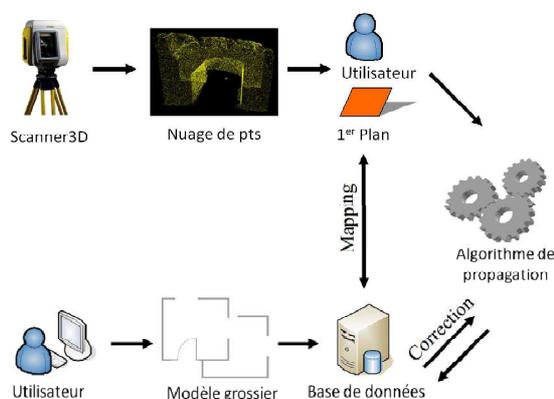


Fig. E1 processus de reconstruction 3D sémantique d'objets architecturaux : En haut à gauche se trouve le scanner 3D qui fournit un nuage de points à l'utilisateur. À partir de ce nuage de points, l'utilisateur sélectionne un sous nuage correspondant à un mur. Avant cette phase, l'utilisateur définit rapidement un «MG » qui est stocké dans la base de données. Une fois la

mise en correspondance du sous-nuage de points et du mur dans le « MG », la reconstruction est démarrée et le « MG » est corrigé. [CRUZ]

2.1.2. La restitution photogrammétrique

La restitution photogrammétrique permet d'extraire des images un ensemble de coordonnées exprimées dans l'espace-objet. Ces méthodes diffèrent en fonction de la configuration de l'acquisition : mono, stéréo ou multi images [Grussenmeyer et al. 2001]. [LIV06]

Concernant les méthodes de reconstruction basées sur la photogrammétrie, celles-ci utilisent des photographies de l'objet à reconstruire prises sous différents angles. Il est possible de définir deux groupes de méthodes. Le premier groupe est constitué de méthodes semi-automatiques. Cela consiste à interagir avec l'utilisateur tout au long du processus de reconstruction (voir fig. E2, E3, E4). Le deuxième groupe de méthodes est constitué des méthodes automatiques où l'utilisateur n'intervient que pendant la phase d'initialisation du processus.

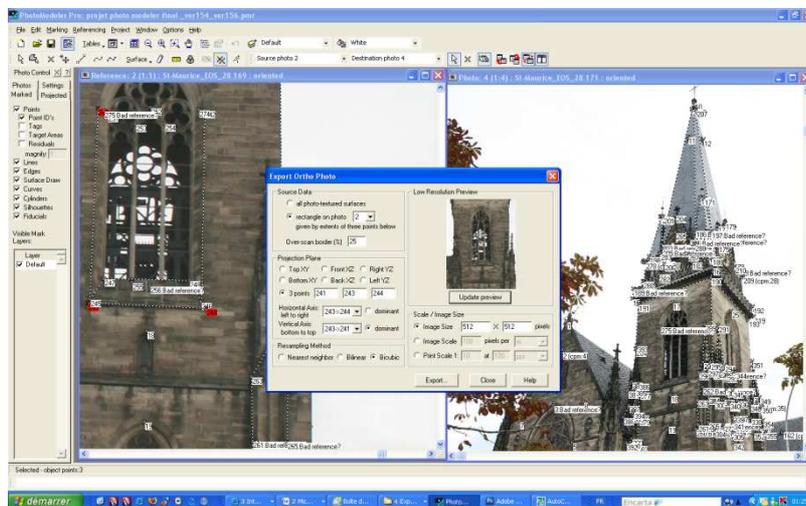


Figure E2 repérage des points sur les images

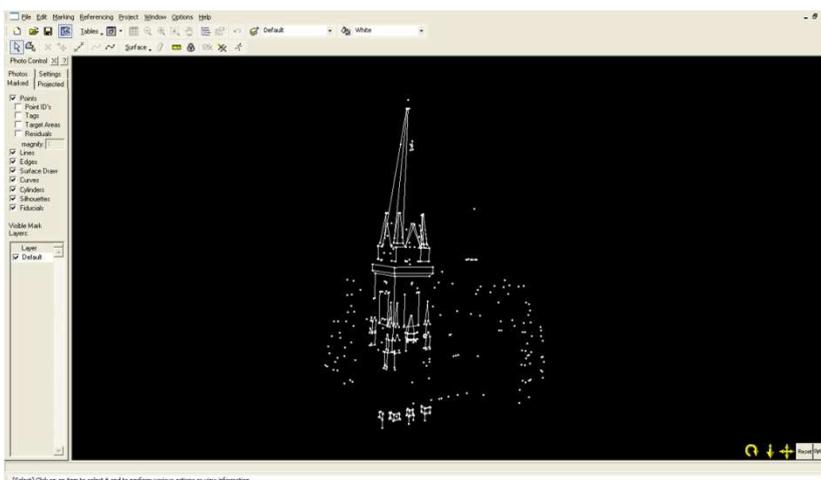


Figure E3 Le nuage de points 3d de l'édifice (l'Église Saint-Maurice à Strasbourg)

Cette technique est très efficace pour l'acquisition des données spatiales. Par contre, la difficulté est apparue lors de la reconstruction tridimensionnelle. Quelles technologies peut-on utiliser pour la modélisation des données architecturales ?



Figure E4 la modélisation du clocher

2.2. Outils et techniques pour la modélisation :

La modélisation consiste à construire le modèle géométrique de l'édifice en s'appuyant sur les mesures issues de la phase de relevé (par les outils d'acquisition). Plusieurs techniques permettent une reconstruction automatique, semi-automatique ou manuelle des surfaces à partir des nuages de points. Ces techniques diffèrent en fonction des données d'entrée qu'elles peuvent traiter et du type de représentation géométrique qu'elles peuvent générer.

Dans cette optique, nous allons présenter quelques travaux de recherches effectués sur ce sujet.

2.2.1. Modèle paramétrique pour la reconstruction automatique en 3D de zones urbaines denses à partir d'images satellitaires haute résolution

Lafarge et al. [LAF05] ont développé, dans un contexte automatique, à partir de données aériennes et laser avec l'association d'un autre type de données (les images satellitaires), un modèle paramétrique pour la reconstruction automatique de modèles 3D urbains.

Par contre, la résolution «faible» des images ne permet pas d'utiliser les méthodes mises en place dans le cas des images aériennes.

Dans cette optique, ce modèle paramétrique est fondé sur une approche bayésienne, totalement automatique, à partir d'images satellitaires. Ce choix permet d'obtenir une faible complexité algorithmique pour une bonne robustesse aux données satellitaires.

Afin d'extraire les bâtiments de manière automatique, ils utilisent des travaux développés dans le projet Ariana (INRIA/13S), à partir du Modèle Numérique d'Élévation (MNE) (voir fig. A1). Cette méthode automatique d'extraction des emprises de bâtiments fondée sur des processus ponctuels marqués est utilisée afin de fournir une information de type cadastrale sous forme d'une configuration de rectangles (voir fig. A2). Fondée sur un modèle de bâtiments, paramétrique à base rectangulaire, la méthode proposée développe une approche bayésienne : «il s'agit de chercher la meilleure configuration de modèles qui respecte à la fois une connaissance a priori sur les modèles et leurs interactions, et une attache aux données qui minimise l'erreur entre les modèles et le MNE.» [LAF05]

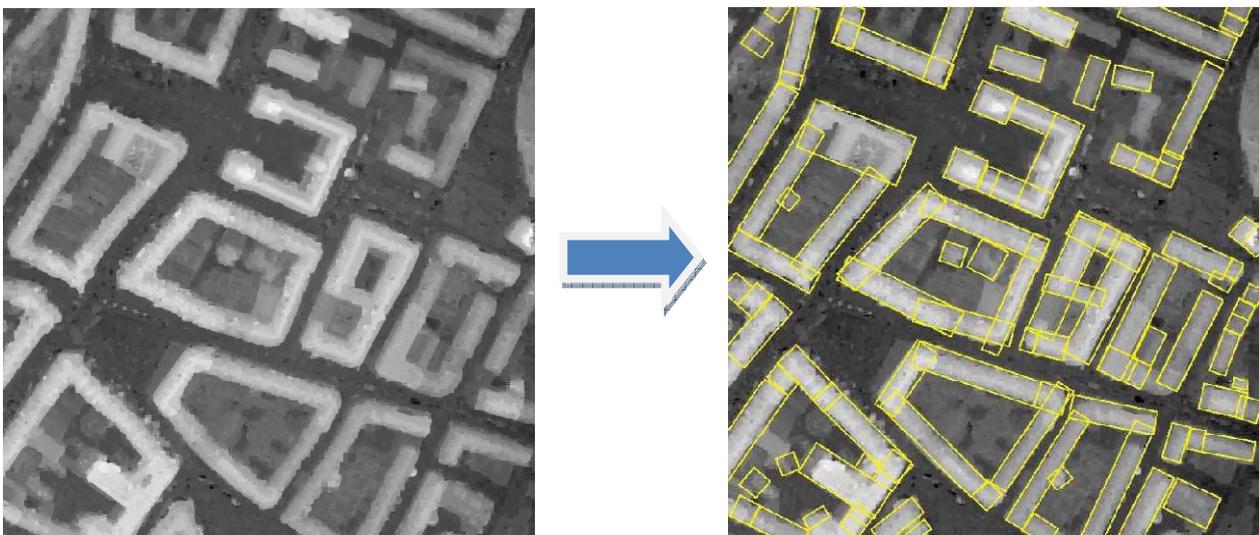


Figure A1 A gauche : Modèle Numérique d'Élévation du centre ville d'Amiens (©IGN) – A Droite : Extraction de bâtiments par processus de rectangles à partir du MNE (©Ariana)

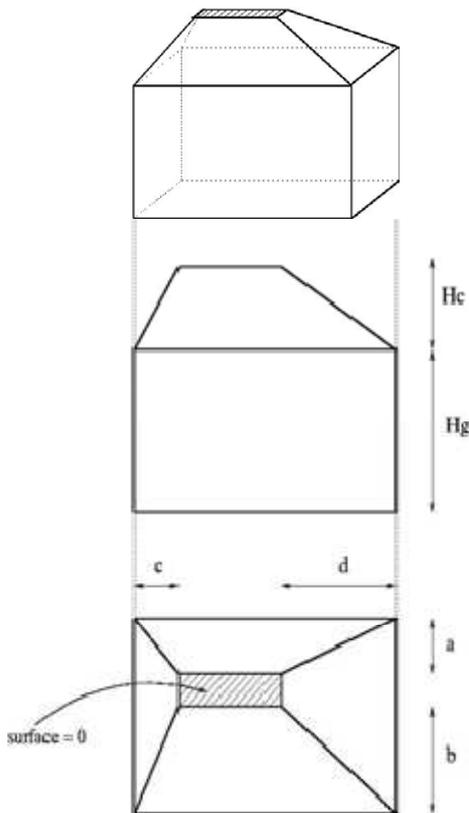


Figure A2. Modèle paramétrique proposé

Les modèles paramétriques à base rectangulaire peuvent directement être fixés sur les rectangles fournis par la méthode d'extraction. Ce modèle à base rectangulaire permet de modéliser une large gamme de toits simples, allant du monoplan au quadriplan. Ce modèle est défini par six paramètres (H_g, H_c, a, b, c, d) (voir fig. A2).

En milieu urbain, les arêtes faîtières de bâtiments voisins sont, dans une grande majorité des cas, continues et connectées entre elles. Cette connaissance a priori favorise le raccordement des arêtes faîtières entre les modèles voisins.

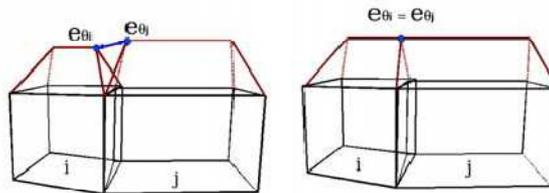


Figure A3 Différents raccordements des arêtes faîtières

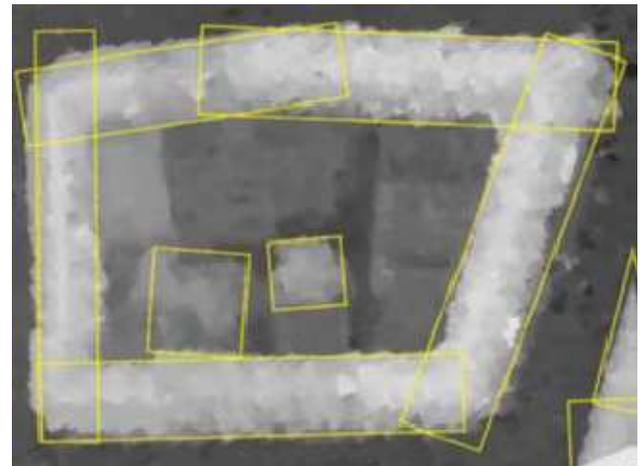
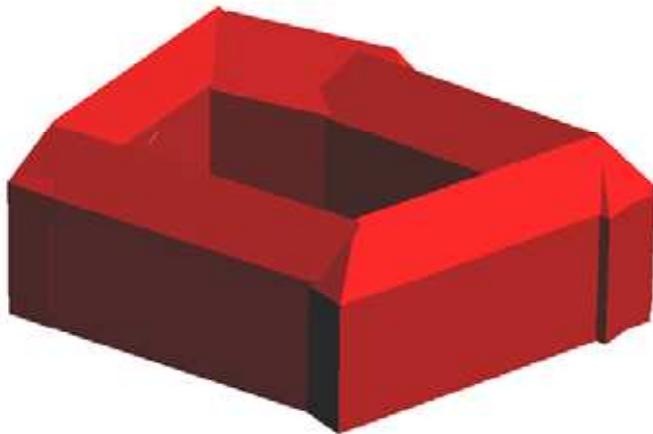


Figure A4 Exemple de bâtiment reconstruit - A gauche : Résultat – A Droite : Données associées

Bilan :

- Les résultats obtenus par cette approche montrent que l'utilisation de modèles paramétriques est bien adaptée aux données satellitaires haute résolution, dans un contexte automatique.
- Le modèle paramétrique retenu permet de modéliser de manière très satisfaisante une majorité de structures urbaines.
- Le modèle paramétrique permet de modéliser des toits simples avec un minimum des paramètres par contre les toits complexes restent à l'écart de son domaine d'utilisation.
- Le temps de calcul reste le principal inconvénient.

2.2.2. Modélisation Procédurale de Constructions(Bâtiments), Procedural Modeling of Buildings

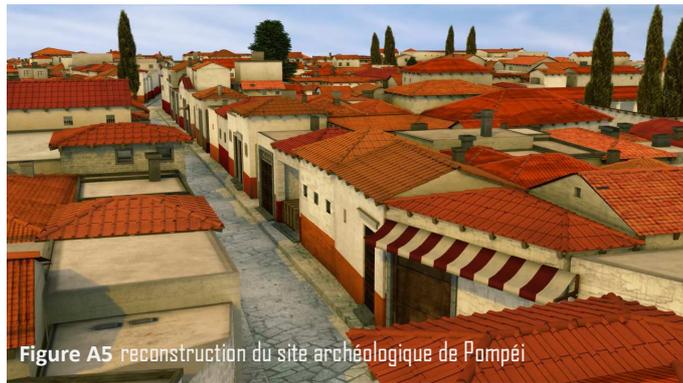
CGA shape, une nouvelle grammaire de forme pour la modélisation procédurale en architecture avec la haute qualité visuelle et le détail géométrique. Il produit des modèles architecturaux vastes pour des jeux électroniques et des films, à bas prix.

Des règles de forme contextuelles permettent à l'utilisateur de spécifier des interactions entre les entités des descriptions de formes hiérarchiques. CGA shape traite des problèmes de modélisation précédemment non résolus, particulièrement de la modélisation de masse cohérente avec les formes volumétriques d'orientation arbitraire et il propose quelques solutions.

CGA shape produit des modèles urbains massifs avec un niveau sans précédent de détail, comme le montre l'exemple de la reconstruction virtuelle du site archéologique de Pompéi. (Voir fig. A5)

La modélisation procédurale utilise des grammaires de forme capables de créer efficacement de grandes villes

avec un haut détail géométrique et jusqu'à un milliard de polygones. Le temps pour reproduire ces résultats avec les logiciels de modélisation existants serait beaucoup plus élevé. [MULOG]



Cette figure(A6) montre l'application de CGA shape, une nouvelle grammaire de forme pour la modélisation procédurale en architecture. D'abord, la grammaire produit les variations procédurales du modèle de masse de construction (bâtiment) en utilisant des formes volumétriques. Ensuite elle crée le détail de façade compatible avec le modèle massif. Des règles contextuelles assurent que les entités comme des fenêtres ou des portes ne se croisent pas avec d'autres murs, que les portes ouvrent sur des terrasses ou le niveau de la rue, que les terrasses sont limitées par des rails, etc.



Figure A7 à gauche une construction (un bâtiment) produite avec CGA shape. Les trois autres modèles ont été produits en étendant la grammaire.

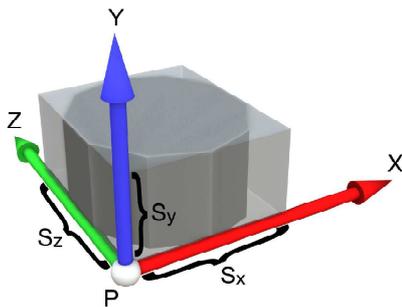
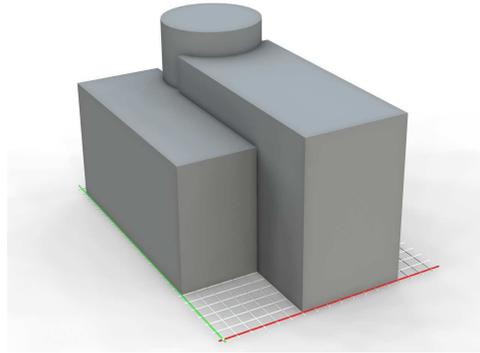


Figure A8



À gauche la portée (le périmètre) d'une forme. Le point P, avec les trois axes X, Y et Z et la taille S définit une boîte dans l'espace qui contient la forme. À droite: une construction (un bâtiment): simple modèle de masse composé de trois formes primitives.

Bilan

-Une nouvelle grammaire de forme pour la modélisation procédurale pour construire des enveloppes afin d'obtenir des modèles de ville à grande échelle.

- Il utilise l'aspect de modélisation de masse volumétrique des constructions (bâtiments) incluant le design (la conception des **toits**).

-la création de modèles massifs de ville qui ont un niveau de détail géométrique, plus important que n'importe quel modèle urbain existant créé dans l'industrie ou dans les recherches.

-il n'atteint pas le niveau de complexité au niveau des détails architecturaux des toits espérés.

2.2.3. Quelles technologies utiliser pour l'implémentation de la modélisation des données architecturales ?

Bien que la modélisation des données architecturales soit une approche et non une technologie, son implémentation requiert une technologie adéquate. Parmi ces technologies, citons, par exemple, par ordre croissant d'efficacité :

- la CAO ;
- la CAO orientée objet ;
- la modélisation des données architecturales paramétrique

La figure A9 indique l'efficacité générale ou le degré de rentabilité de chacune de ces trois technologies (axe vertical) par rapport aux efforts nécessaires à l'obtention de cette rentabilité (axe horizontal). La ligne pointillée horizontale représente le degré minimal d'efficacité attribué à la modélisation des données architecturales.

La croissance de l'efficacité de la modélisation des données architecturales est reproduite au-dessus de la ligne de seuil de modélisation des données architecturales. Les trois lignes

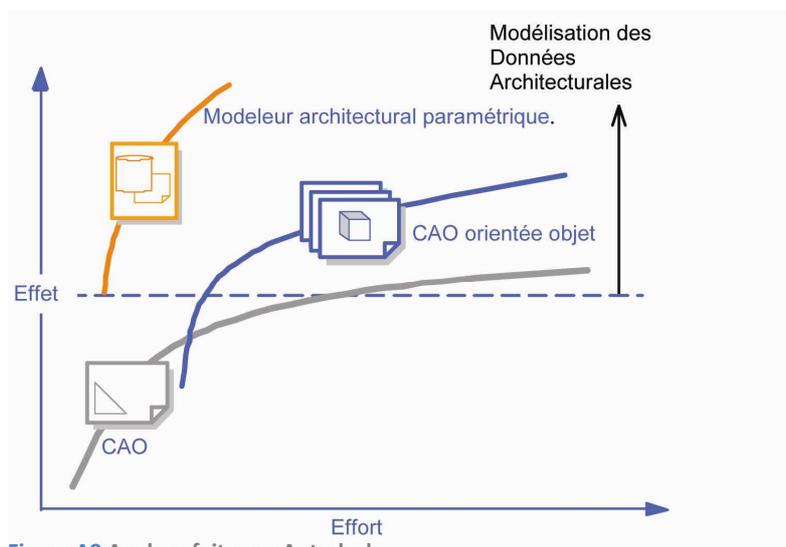


Figure A9 Analyse faite par Autodesk

montrent l'efficacité atteinte à des niveaux d'efforts spécifiques lors de l'utilisation de l'une de ces trois technologies. [www.autodesk.com/buildinginformation]

CAD

La ligne grise du graphique représente l'application de CAD, c'est-à-dire le logiciel reposant sur la technologie traditionnelle de CAD (basée sur la géométrie) utilisée dans le secteur de l'industrie depuis des décennies. Cette technologie prend en charge l'automatisation du dessin et avec un minimum d'efforts. Toutefois, pour une efficacité plus grande, des efforts plus importants sont nécessaires.

CAD orientée objet

La ligne bleue du graphique représente le logiciel basé sur la CAD orientée objet. Cette technologie permet de simuler les éléments architecturaux dans un environnement CAD, avec une attention toute particulière sur les données géométriques 3D de la construction, la génération de la documentation 2D à partir des données géométriques 3D et l'extraction des données de l'objet depuis les composants architecturaux, afin de fournir des informations sur les quantités et les propriétés de l'objet.

Modélisation des données architecturales paramétrique

La ligne orange du graphique représente la technologie de modélisation des données architecturales paramétrique.

Parmi les caractéristiques importantes du logiciel basé sur la technologie de modélisation des données architecturales, on peut citer :

- La répercussion immédiate dans l'ensemble du projet et dans toutes ses représentations des modifications des liaisons entre les objets.
- La définition par l'utilisateur de toutes les liaisons existantes à l'intérieur du modèle (et pas uniquement les liaisons préprogrammées par les développeurs, telles qu'une fenêtre logée dans un mur). Cela inclut la définition graphique des objets paramétriques par l'utilisateur final.

Comme le montre la figure A9, le modèleur architectural paramétrique est l'outil le plus efficace pour la modélisation des données architecturales. Et dans ce contexte, le laboratoire CRAI développe le logiciel G.O.P qui permet de faciliter la modélisation et d'ajuster les éléments aux données acquises.

2.2.4. Modélisation paramétrique à l'aide du GOP :

GOP est un outil qui pourrait apporter une grande assistance aux architectes et aux archéologues. Son domaine d'utilité est divers : il va de la modélisation 3D rapide pour les films ou le paysage des jeux à la modélisation précise pour des buts archéologiques ou à la création des scènes 3D utilisables pour les différentes simulations (dynamique, lumineuse...).

Le développement de **GOP** est exécuté dans l'environnement Maya avec MEL et le langage C ++. Maya permet l'ajout de plugins et de menus à l'interface graphique pour l'utilisateur. L'objet Maya est décrit par un jeu des attributs qui apparaissent dans une fenêtre quand l'objet 3D est sélectionné dans la scène. Quand un attribut est modifié, la méthode "compute" est appelée et l'objet peut être produit de nouveau avec les nouvelles valeurs. À chaque composant architectural correspond un objet Maya, à chaque paramètre correspond un attribut Maya. En outre, Maya permet l'utilisation de toutes les fonctions de son modèleur et des possibilités pour

les créations de sculpture, des ajustements spécifiques et des déformations de forme. [CHEV08]

Pour aider l'utilisateur dans la création et dans l'ajustement d'un composant, GOP inclut la possibilité d'utiliser des données diverses : images, balayage de laser 3D (sélection de points de nuage) (Voir fig. A10). Ces sélections permettent le positionnement de l'élément architectural dans la scène 3D. Une autre aide au positionnement dans la scène est l'utilisation d'une description hiérarchique et d'un positionnement relatif. (Voir fig. A11)

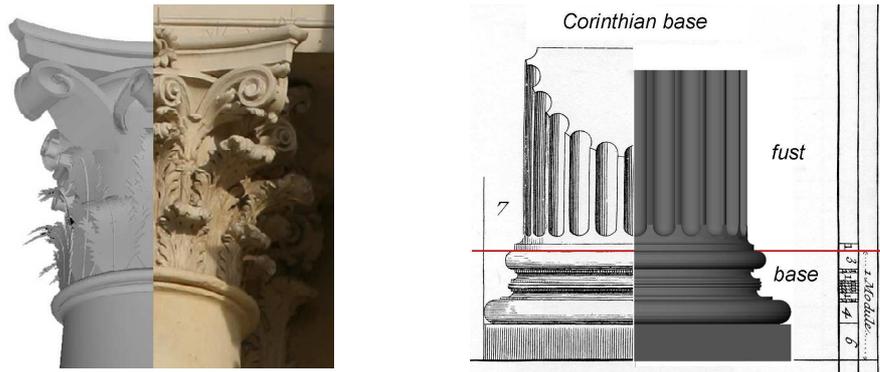


Figure A10 Ajustement du modèle aux photos de base

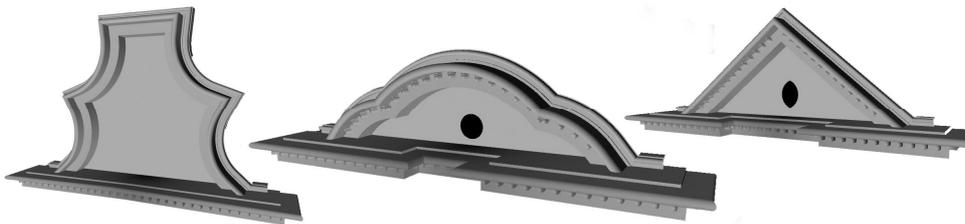


Figure A11 Modélisation automatique de différents types de fronton

Bilan:

GOP peut développer divers éléments architecturaux. Ces derniers seront stockés dans une bibliothèque et utilisés par ailleurs en identifiant leurs paramètres.

Le but est d'étudier l'élément architectural en identifiant ses paramètres et la méthode adéquate pour sa modélisation.

2.3. Conclusion:

Nous venons de présenter en premier lieu quelques méthodes d'acquisition pour montrer la nécessité des outils de reconstruction.

En deuxième lieu, nous avons exposé quelques méthodes de reconstruction. Nous avons étudié leurs procédés de modélisation des toits pour ressortir les avantages et les inconvénients. En effet, la majorité des travaux nécessite des processus longs et difficiles pour les utilisateurs (architectes, urbanistes, archéologues...). D'autres nécessitent la restitution de toutes les lignes caractéristiques des toits et ils subsistent des difficultés à générer des surfaces planes à partir des lignes 3D.

Enfin, nous avons présenté le logiciel GOP pour bien cerner notre objectif.

Notre étude alors est de parvenir à identifier l'élément architectural « toiture » et de mettre en œuvre un processus de paramétrage pour générer sa modélisation.

3. Contexte de l'étude

LA TOITURE, introduction

Depuis le début de son existence, l'homme a toujours cherché à se protéger et à s'abriter. Dès la fin de l'occupation des grottes, il a inventé une nouvelle méthode de vie avec d'autres typologies de construction, dont le toit consistait l'élément principal. Depuis, ce dernier a fait l'objet de la créativité architecturale de l'humanité.

« La variété formelle des toitures n'a cessé d'évoluer et de s'enrichir en fonction des peuples et des civilisations depuis la préhistoire » [T1]; en effet il est difficile de se rappeler d'une ville, d'une société, d'une époque voire une civilisation sans qu'on puisse les différencier par leurs architectures, leurs traitements et plus spécifiquement leurs toitures. Les huttes distinguent la préhistoire, la toiture-terrasse caractérise la Mésopotamie et l'Égypte antique, l'architecture traditionnelle chinoise et ses fameux toits... où chaque typologie de toiture nous rappelle une dynastie spécifique et nous renvoie vers la diversité des formes et leur principe constructif.

« Aussi significative de la nature des civilisations, la notion de toit devait donc aisément s'enrichir, développer des formes, établir une syntaxe et une grammaire, solliciter l'effort des matériaux naturels d'abord, et désormais industriels » [T2]

Les formes de toit sont très diverses et dépendent de la façon de construire et de l'architecture : usage exclusivement de maçonnerie ou usage de maçonnerie surmontée de bois assemblés en charpente ou encore usage exclusivement de charpente bois ou métal y compris pour les murs qu'ils soient ou non verticaux (voir fig.1.2). Le remplissage fait par la couverture de toit est opaque ou transparent. Le toit reprend dans certaines traditions des idées symboliques de l'univers, il peut par exemple être en découpe et en empilement sur plusieurs étages en les entourant par exemple dans la pagode chinoise (voir fig.3). Le toit peut aussi être considéré comme une sculpture composée de membres maçonnés en piles petites et grosses montant vers le ciel et assemblées, par exemple en composition des toits de temples d'Extrême-Orient, en composition d'églises avec clochers et pinacles(voir fig.5).

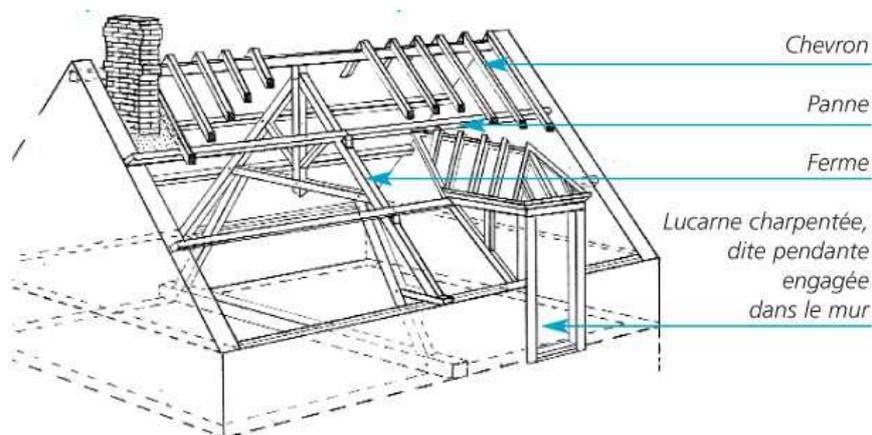


Figure 1 Principe constructif d'une charpente

Toitures des constructions en maçonnerie : le toit s'arrête au bord du mur pignon, les rives sont maçonnées.

Toiture des constructions en torchis ou en bauge : le toit déborde au dessus du mur pignon pour le protéger.

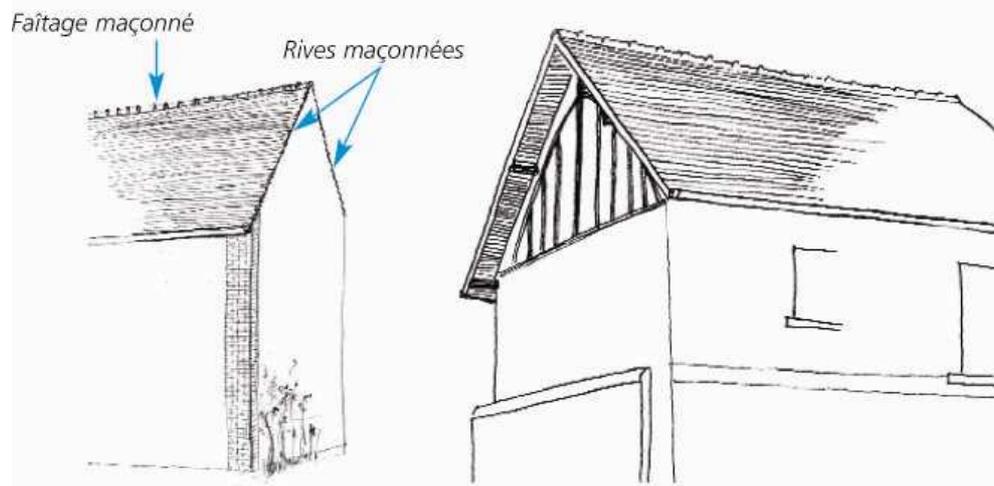


Figure 2 En fonction des techniques constructives : différents traitements des rives du toit

La toiture est l'ensemble de ce qui compose le toit d'une maison, d'un bâtiment. C'est l'élément protecteur d'un édifice.

« Le **toit** est la surface couvrant la partie supérieure d'un **édifice**, permettant principalement de protéger son intérieur contre les **intempéries** et l'**humidité**. » [T3]

D'ailleurs, la toiture est la partie la plus importante du bâtiment, car elle le protège et le symbolise en affirmant son achèvement comme il l'a dit Paul Jacques Grillo: « Un toit est la partie la plus essentielle d'un bâtiment. Les gens ont vécu sans murs, mais jamais sans toits » [T4].

La toiture peut prendre plusieurs formes. Elle peut être inclinée, horizontale, courbe... (Voir fig.3.4.5.6).

Sa forme n'a cessé de changer selon les civilisations et les groupes ethniques [T5]. Il est difficile alors d'évoquer l'évolution formelle des toitures sans la percevoir selon l'histoire.

Pour cette raison, on va négliger en premier lieu l'étude de l'évolution formelle pour étudier en deuxième lieu la forme elle-même. Le critère d'étude sera alors la **Forme géométrique** des toitures.



Figure 3 la pagode chinoise, Beijing, Chine



Figure 4 Basile le Bien Heureux comme un gros gâteau, Moscou, Russie



Figure 5 le clocher à bulbe de l'église de Crévoux, France

La procédure d'approche vers notre objectif se structure donc autour des rapports entre une analyse de la classification formelle des différentes typologies des toitures existantes et une analyse de leurs paramétrages pour générer les algorithmes adéquats à la modélisation 3D.

Dans cette optique, j'ai collecté les données nécessaires des diverses toitures (photos, citations...) afin d'effectuer une analyse générale, d'engendrer la classification appropriée des toitures et de ressortir les paramètres facilitant leurs modélisations.

Selon la complexité de la construction formelle des toitures, j'ai essayé de les classer en deux catégories: **SIMPLES ET COMPOSEES**



Figure 6 différentes typologies des toitures

B. Toitures simples :

En étudiant les toitures simples, j'ai effectué une deuxième classification selon deux critères: la forme géométrique et la procédure de la modélisation. On peut alors, comme le montre la figure 7, classer les toitures simples en cinq grandes familles.

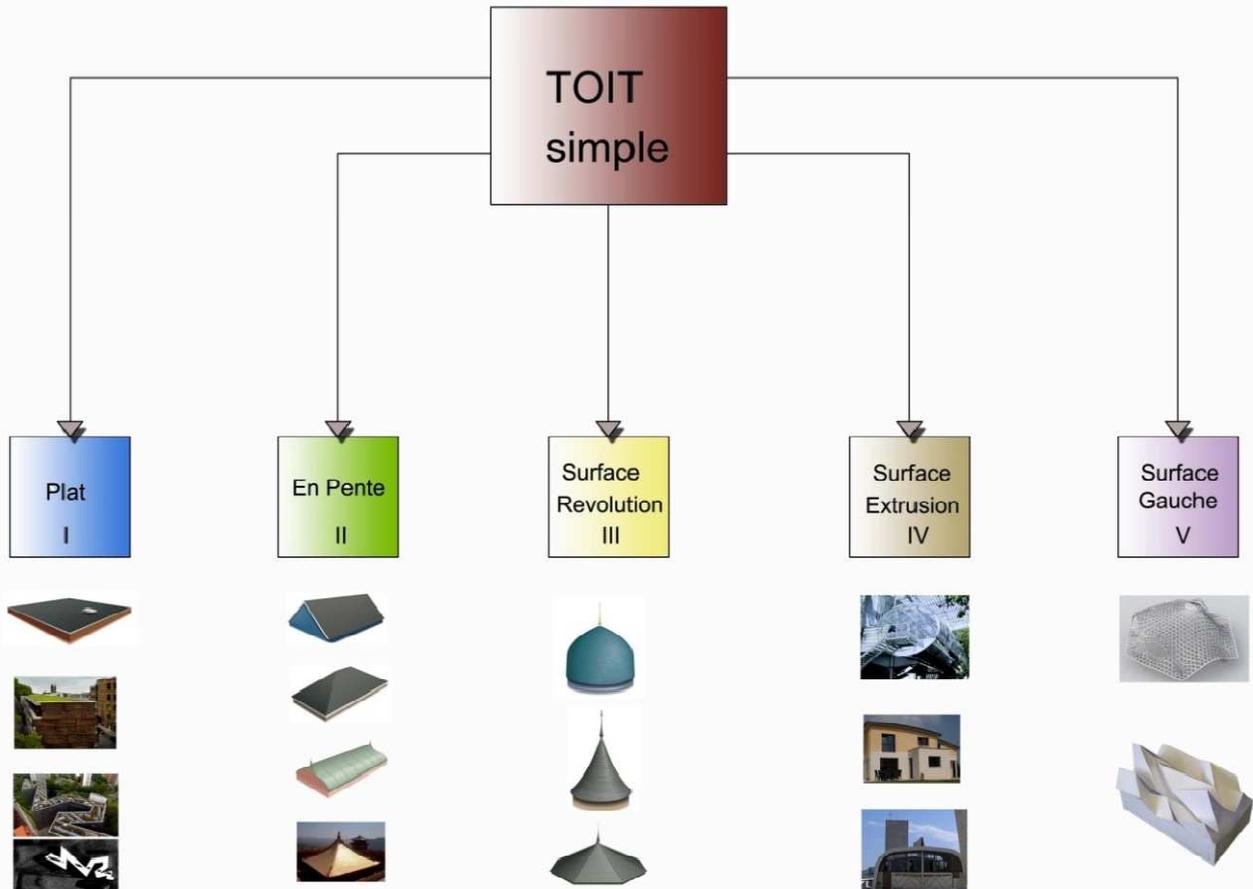


Figure 7 Classification des toitures simples

I. TOITURE PLATE

"Un toit, c'est un droit!". [TG]

Ce sont les toitures à surfaces horizontales. Elles existent depuis longtemps dans l'architecture orientale dont le climat est sec. Par contre, cette typologie des toits n'a été utilisée en Europe qu'avec la découverte du béton. Et depuis; elle est devenue l'emblème de l'architecture moderne.



Figure 8 Les toitures-terrasses

Concernant ce type de toiture, sa modélisation n'est pas compliquée. Il suffit de définir le contour ou le plan de la toiture pour générer son modèle 3D.

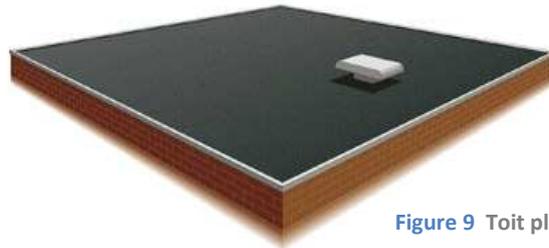


Figure 9 Toit plat

II. TOIT EN PENTE:

II .1. Introduction

Les toitures en pente sont des constructions à surface inclinée (voir fig.11). Elles ont été utilisées pour la première fois avec la ferme latine inventée à l'époque romaine. (villa suburbaine de type pompéien) voir fig.10

Elles sont réapparues pendant la renaissance en Italie pour dominer par la suite toute l'Europe et devenir la typologie de toit la plus adaptée.

Les toitures en pente se composent de plusieurs composantes comme le faitage, l'arêtier, la rive, le pan... (Voir figure 12)

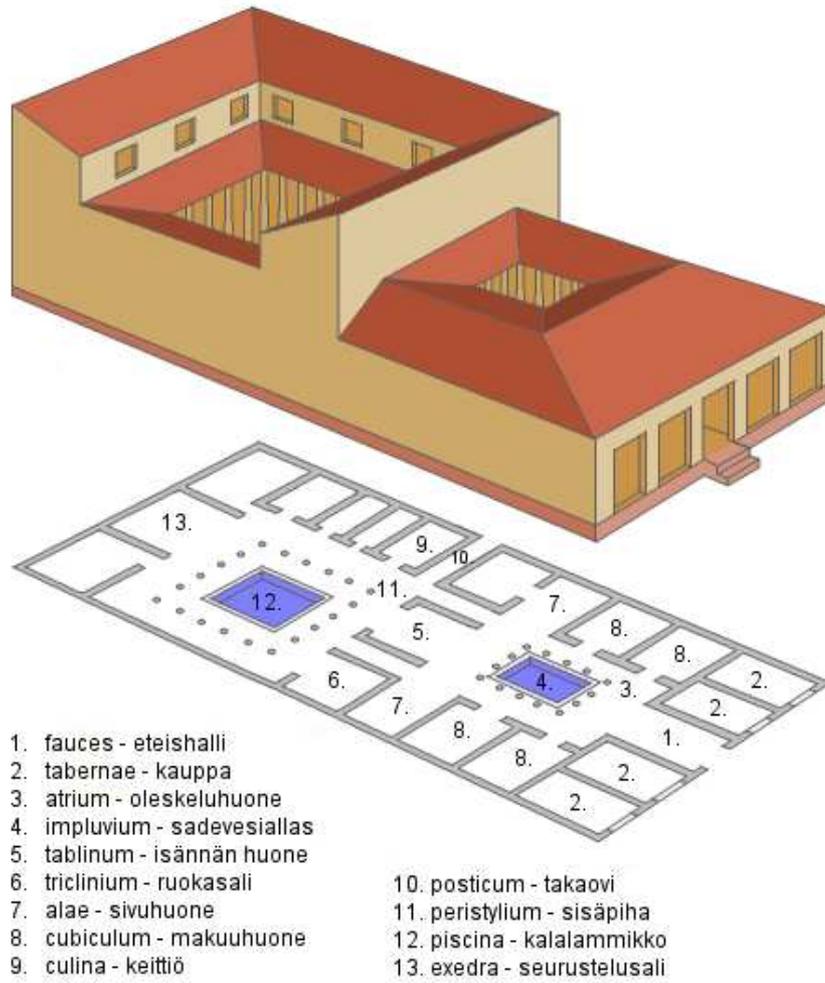


Figure 10 Villa suburbaine de type pompéien

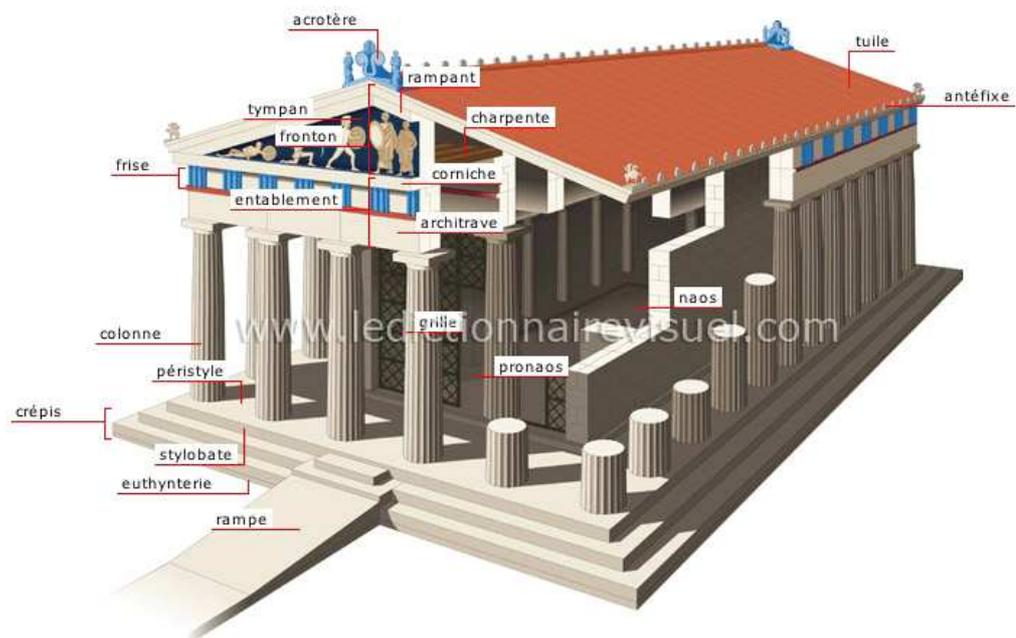


Figure 11 Temple-grec

Le schéma 12 illustre les différentes composantes et les éléments constructifs de la toiture en pente.

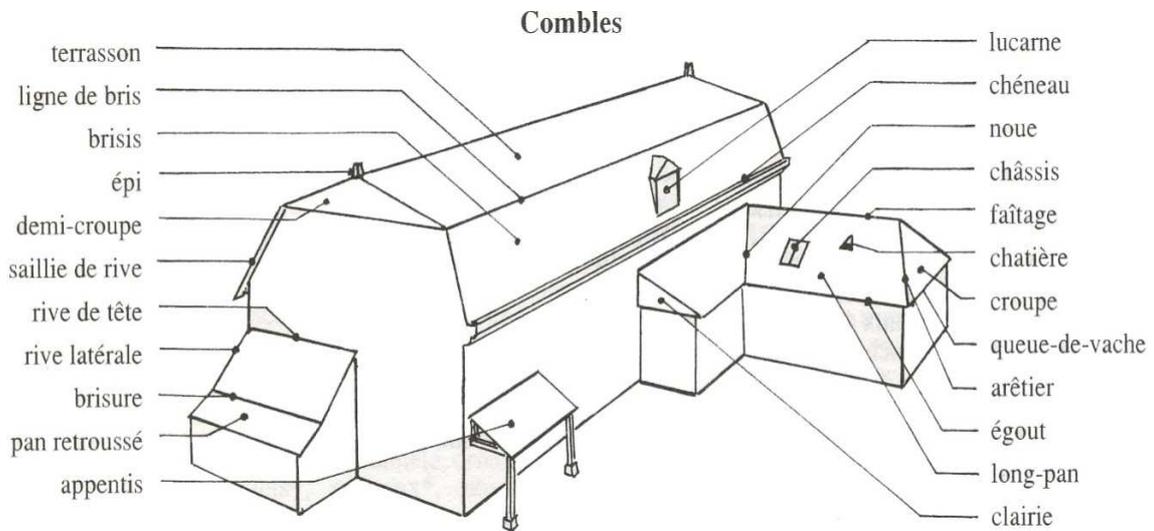


Figure 12 Composantes du toit en pente

Cette typologie de toiture se manifeste par plusieurs formes avec différentes nominations comme présenté sur les figures de 13 à 17.



FIG.13 Toit à un pan ou appentis

Le toit à un pan est la forme la plus simple; en règle générale, le rang supérieur de la couverture est constitué par des tuiles faîtières spéciales.

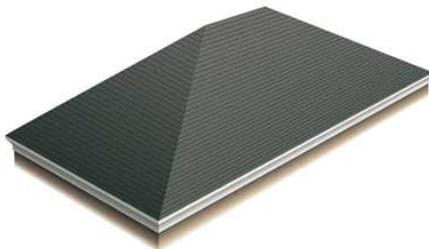
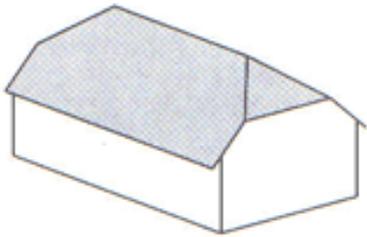
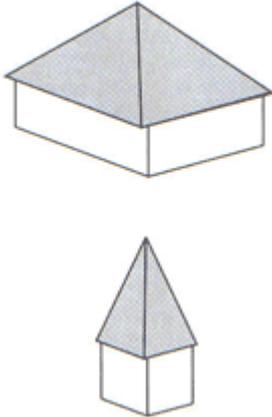


FIG.14 Toit à deux croupes et deux pans longs

Le toit à deux croupes et deux pans longs se distingue par la disposition généralement sur les quatre côtés

	<p>FIG.15 Toit à deux pans Le toit à deux pans, également dénommé toit en selle, est la forme la plus fréquemment utilisée. Dans la partie inférieure du toit à deux pans et de ses variantes, on opte souvent pour une rupture de pente.</p>
	<p>FIG.16 Toit à deux demi-croupes et deux longs pans Ce type de toit allie les caractéristiques du toit à deux pans à celles du toit à deux croupes. Les pignons sont relativement ouverts, mais bien protégés contre les intempéries.</p>
	<p>FIG.17 Toit en pavillon Avec le toit en pavillons, les arêtiers (ligne d'intersection latérale de deux pans contigus) se rejoignent au sommet. La surface de base est carrée, rectangulaire ou polygonale. Les toits pyramidaux ou tourelles peuvent être des toits en pavillon à pans très raides.</p>

Dans cette première partie, nous venons de définir la toiture en pente et de préciser les éléments morphologiques qui la constituent. Nous avons ainsi présenté ses diverses typologies. Nous remarquons alors que sa modélisation dépend de deux facteurs essentiels : le faitage et la base de la toiture.

Le but de la partie suivante est d'aborder l'analyse de ces deux facteurs et de constater leurs paramétrages. Ce dernier va engendrer une nouvelle hiérarchie.

II.2.Faitage :

Le faite est la ligne de rencontre haute de deux versants d'une toiture(Fig.18). Le faitage est l'ouvrage qui permet de joindre ces deux parties. Il doit assurer l'étanchéité de la couverture d'un bâtiment, ainsi que sa solidité. (Fig.19)



Figure 18



Figure 19 Faitage ventilé en tuiles béton.

En analysant les différentes formes de faitage, on peut les classer en trois types

II.2.1.Faitage point :

C'est la première catégorie de faitage. Dans ce cas, le faitage est un point et on aura comme résultat les toits en pavillon, toits en flèche... (Fig.20)

Pour fixer le faitage point, il faut repérer la position du point dans l'espace.

Cette étape sera aboutie en donnant les coordonnées X, Y, Z, (TABLEAU 1)



Figure 20 Différents toits avec le faitage point

TABLEAU1

Nom	type	Valeur par défaut	Valeur min/max	description
Faitage Point	Point (x, y, z)	0, 0,0 Ou L/2, H/2,1	+/-∞, +/-∞, +/-100	Le faitage est défini par un point qui sera relié aux autres points formant la base de la toiture par le biais des arrêtes

II.2.2.Faitage ligne :

En deuxième lieu, on trouve les toitures avec un faitage en ligne. Ce sont les plus courants ou en d'autres termes les toitures traditionnelles fig. 13, 14, 15, 16, 17, 18.

Paramétrage de la ligne de faîtage (TABLEAU2)

TABLEAU2

Nom	type	Valeur par défaut	Valeur min/max	description
Point de départ O1	Point (x, y, z)	$X_{P1}, P/2, l$	$+/-\infty$	Fig.21
Longueur Lf de faîtage	réel	l	$+/-\infty$	Fig.22
l'angle horizontal H du faîtage	réel	0	$-90 < H < 90$	Fig.23
l'angle vertical V du faîtage	réel	0	$-90 < V < 90$	Fig.24

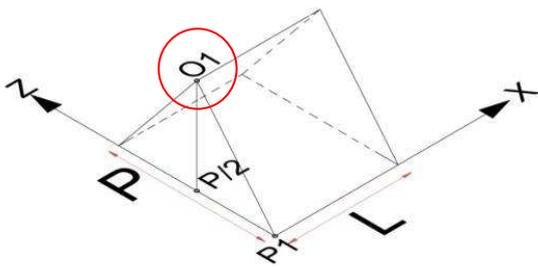


FIG. 21. Point de départ O1

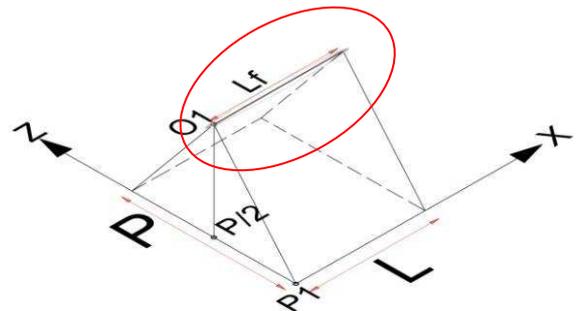


FIG. 22. Longueur Lf de faîtage

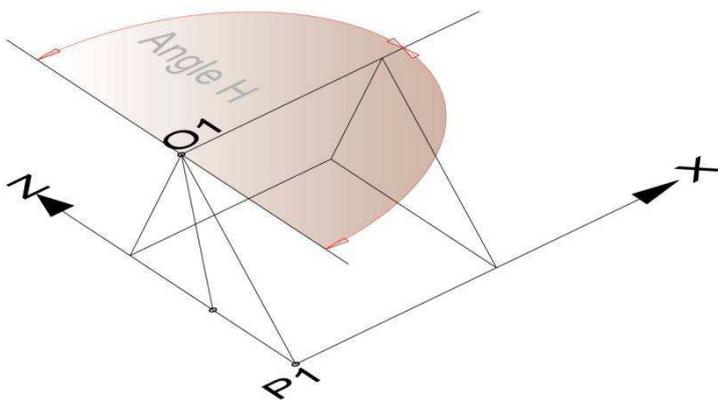


FIG. 23. L'angle horizontal H du faîtage

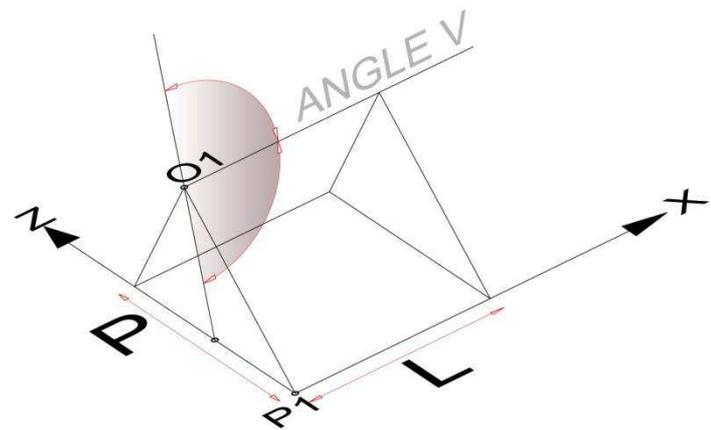


FIG. 24. L'angle vertical V du faîtage

Remarque: Le faîtage en ligne est linéaire donc il peut être une ligne droite rectiligne comme il peut être courbé et dans ce cas la toiture ne sera plus la toiture traditionnelle inclinée et droite; on aura une autre forme de la toiture (comme celle du toit chinois) (voir fig.3)

II.2.3.Faitage forme :

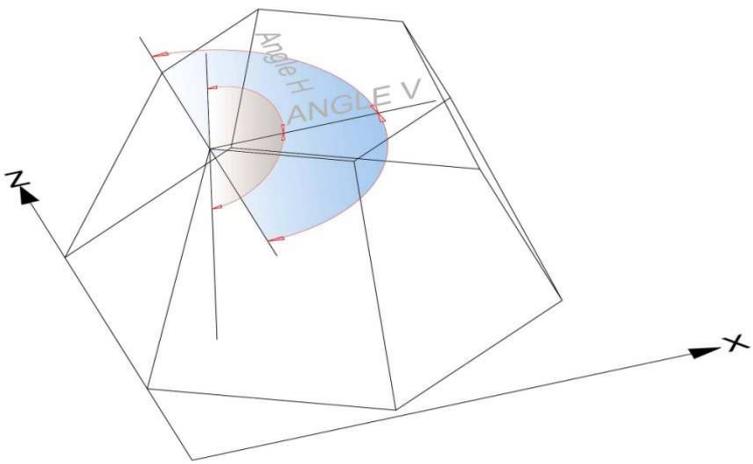
Ce type de faitage est composé de plusieurs segments qui délimitent une forme. Cette dernière peut être identique à la base de la toiture avec une homothétie qui varie selon chaque cas (fig.25.34). Sinon elle forme un contour différent de la base (fig.26). Ce contour il peut être fermé ou ouvert.

Paramétrage :

II.2.3.1.Forme identique:

Le faitage et la base de la toiture ont la même forme, mais avec des dimensions différentes selon la valeur d'échelle de transformation. Si cette dernière a la valeur 1 ils seront parfaitement identiques.

Tableau3

Nom	type	valeur	Valeur min/max	description
échelle de transformation	réel	1	+/-∞	C'est la valeur qui produit la forme de faitage par rapport à la base de la toiture
Point de départ O1	Point (x, y, z)	0, 0,1	+/-∞	Le point de départ pour la construction de la forme (faitage) de la toiture
l'angle horizontal H du faitage	réel	0	-90<H<90	
l'angle vertical V du faitage	réel	0	-90<V<90	

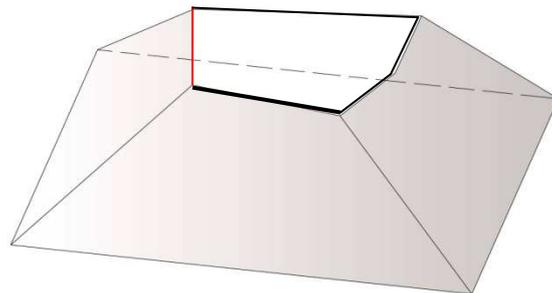
II.2.3.2. Forme différente:

Tableau4

Nom	type	valeur	Valeur min/max	description
Point de départ OI	Point (x, y, z)	0, 0, 0	+/-∞	Le point de départ pour la construction de la forme (faîtage) de la toiture
Points du contour	Liste des points	Vide (l'utilisateur va remplir les valeurs)		ce sont les points qui délimitent le contour de la forme de faîtage de la toiture
l'angle vertical V du faîtage	réel	0	-90<V<90	FIG.25
l'angle horizontal H du faîtage	réel	0	-90<V<90	FIG.25

Le faîtage et la base de la toiture n'ont pas la même forme. Donc la forme de faîtage sera traitée séparément en définissant son contour point par point.

FIG 26. Faîtage forme différente à celle de la base de la toiture



II.2.4. Bilan :

Nous venons de définir et de préciser le premier élément morphologique de toiture « le faîtage » qui intéresse notre étude. Nous avons étudié ce composant selon ses diverses formes géométriques afin d'en ressortir ses paramètres constructifs.

Cet élément est un facteur primordial pour la construction de toiture inclinée. Il agit directement sur la forme du toit afin de préciser sa typologie.

En général, le faîtage est défini par :

- Point de départ OI
- l'angle vertical V du faîtage
- l'angle horizontal H du faîtage
- l'utilisateur définit soit une valeur soit une forme.

II.3. Forme de la base :

Nous abordons maintenant le deuxième élément morphologique de la toiture : la forme de la base. Le but consiste à la décomposer afin d'en déterminer les paramètres en révélant son interaction avec le premier élément dans la définition de la typologie du toit. Elle est décrite par la forme du périmètre de la base de la toiture. En général, il est formé par le plan des murs extérieurs du bâtiment.

II.3.1 Quadrilatère:

La forme de la base est un quadrilatère alors elle peut être régulière comme le carré, le rectangle, le losange (voir fig.18, 27, 28, 30,31) ou irrégulière (voir fig.29)

Tableau5 **Paramétrage**

Nom	type	valeur	Valeur min/max	description
Point de départ P1	Point (x, y, z)	0, 0,0	+/-∞	Le point de départ pour la construction de la base de la toiture
Largeur L	réel	l	+/-∞	C'est la Largeur de la toiture rectangulaire
Profondeur P	réel	l	+/-∞	C'est la Profondeur de la toiture rectangulaire
Angle α	réel	90	90	C'est l'angle entre la largeur et la profondeur de la toiture
Hauteur Point P2	réel	l	+/-∞	Si les angles de faitage changent la hauteur du point sera calculée pour que les facettes restent planes sinon l'utilisateur fixe la hauteur.
Hauteur Point P3	réel	l	+/-∞	
Hauteur Point P4	réel	l	+/-∞	

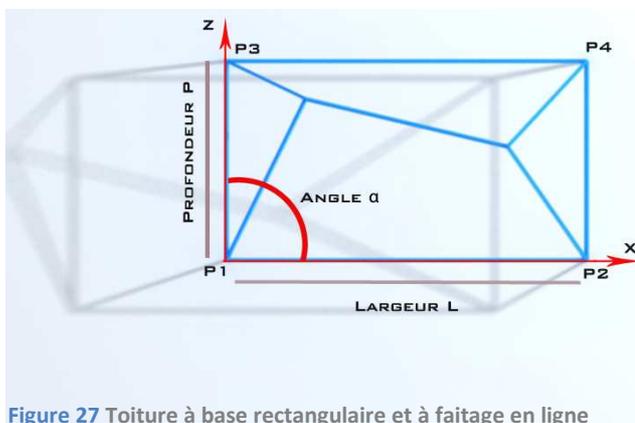


Figure 27 Toiture à base rectangulaire et à faitage en ligne

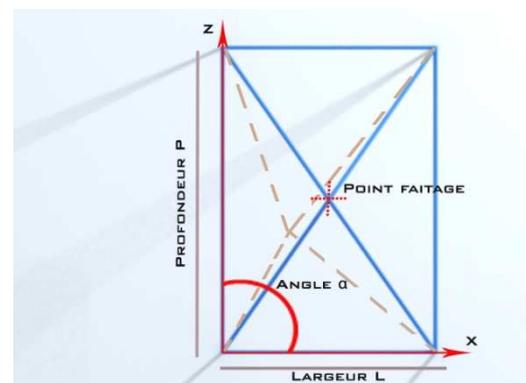


Figure 28 Toiture à base rectangulaire et à faitage point

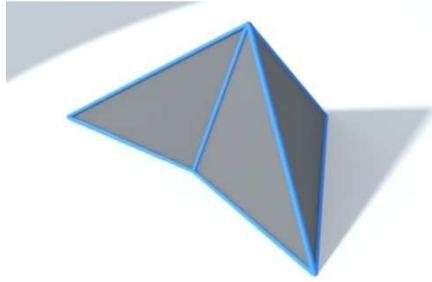


Figure 29 Toiture à base quadrilatère irrégulière et à faitage point

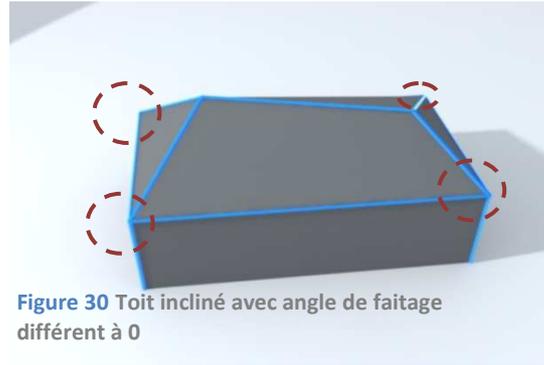


Figure 30 Toit incliné avec angle de faitage différent à 0

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction de cette partie d'étude, nous allons citer l'interaction entre les deux éléments morphologiques de la toiture.

Si on change un paramètre du faitage, un ou plusieurs paramètres de la forme de la base changent et c'est le cas des hauteurs qui forment la base.

En effet, si les angles de faitage (H et V) sont nuls donc le résultat est le toit incliné classique (voir fig.31)

Et si l'angle de faitage (horizontal ou vertical) est différent de zéro, on a :

- Soit des toits avec des pans non plans.
- Soit des toits avec des pans plans. Dans ce cas, c'est le logiciel qui fixe les hauteurs pour garder la planéité des pans. (Voir fig.30)

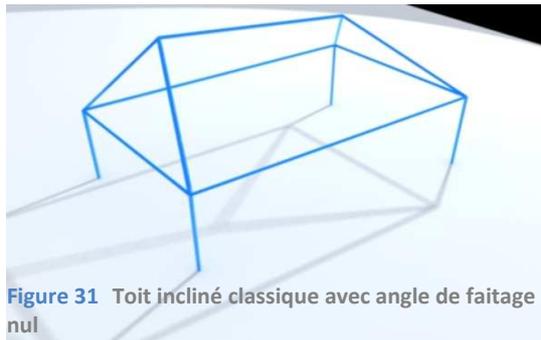


Figure 31 Toit incliné classique avec angle de faitage nul

L'utilisateur peut choisir entre ces deux cas de garder la toiture avec des facettes planes ou non.

II.3.2. plus que 4 cotés :

La forme de la base a plus que quatre cotés elle peut être régulière (voir fig. 32) ou irrégulière (voir fig.33). Sa modélisation dépend de la définition des points de contour.

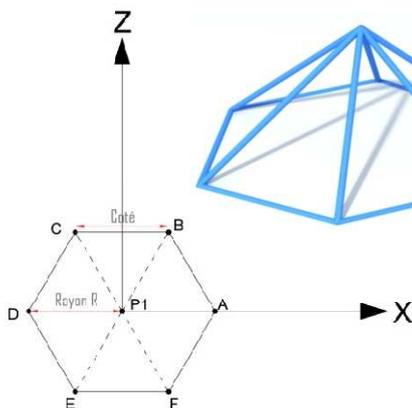


Figure 32 La forme de la base de toiture régulière

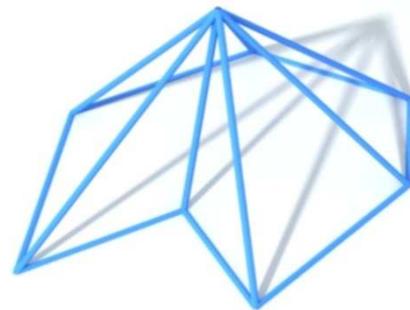


Figure 33 La forme de la base de toiture irrégulière

Tableau6

Nom	type	valeur	description
Point de départ P1	Point (x, y)	0, 0	Le point de départ pour la construction de la base de la toiture
Points de contour	Liste des points	Vide (l'utilisateur va remplir les valeurs)	ce sont les points qui délimitent le contour de la base de la toiture

II.3.3. Bilan :

Dans cette partie, nous avons défini l'élément morphologique de toiture «la base» en le classifiant selon sa forme (nombre des cotés).

J'ai ressorti ses paramètres et de déterminer sa relation avec le faitage

Cet élément est aussi un facteur décisif pour la modélisation de la toiture inclinée. En général, la base est définie par :

- Point de départ P1
- Un nombre de points qui définissent son contour.

II.4. Conclusion :

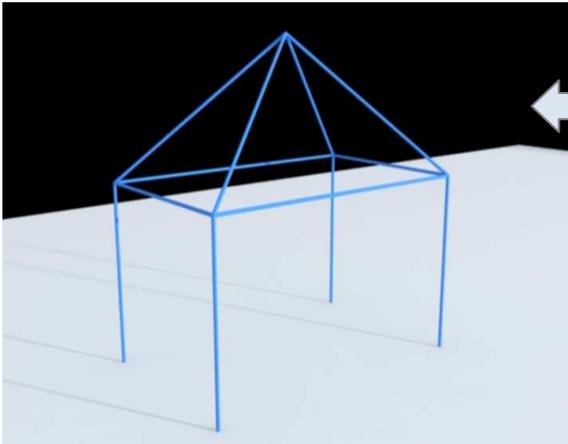
Cette partie nous a permis tout d'abord de définir la toiture inclinée en reconnaissant les éléments morphologiques qui la constituent, la génèrent, mais qui également déterminent sa modélisation géométrique. Nous avons pu décrire en outre ses diverses typologies.

Nous avons analysé la relation entre les deux éléments et leur interaction.

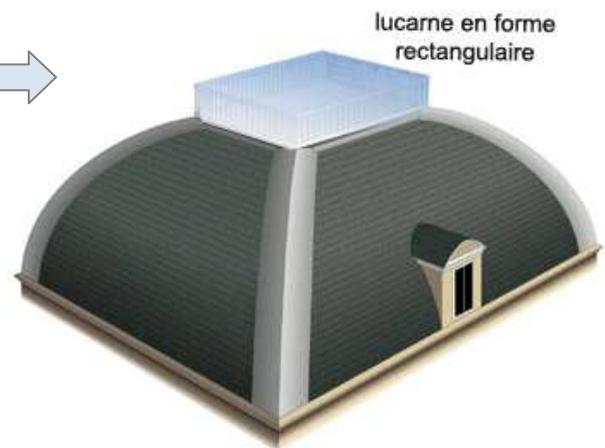
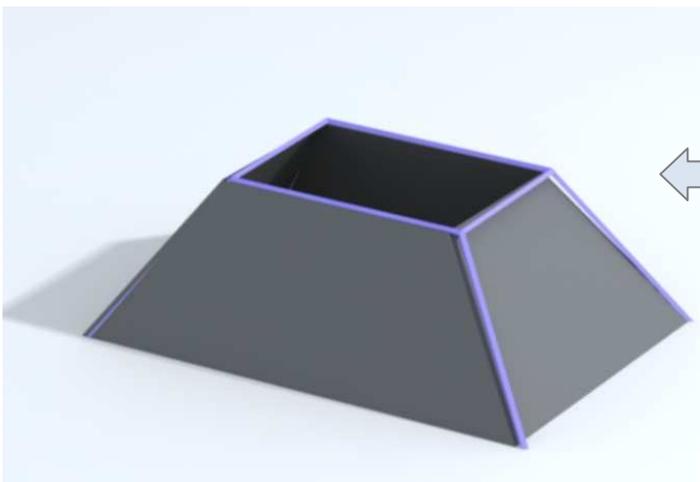
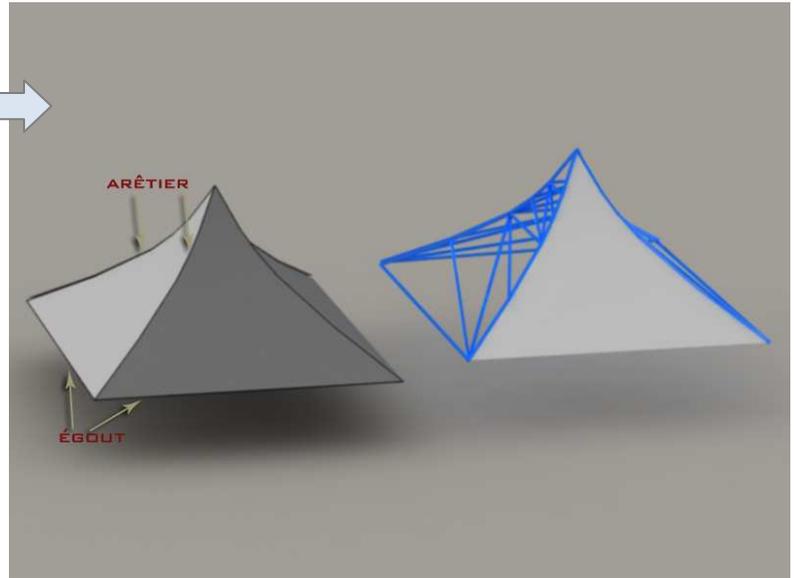
Remarque

On peut passer d'une toiture inclinée classique à une autre forme de toiture comme celle chinoise (voir l'exemple 1) ou celle impériale (voir l'exemple 2) en modifiant, soit l'**égout** soit l'**arétier**: le profil ligne est remplacé par un autre profil (un profil courbe ou un profil en moulures) qui sera déterminé par l'utilisateur.

Dans ce cas, on obtient une variété infinie de toitures en partant de la toiture inclinée simple et en précisant le profil.



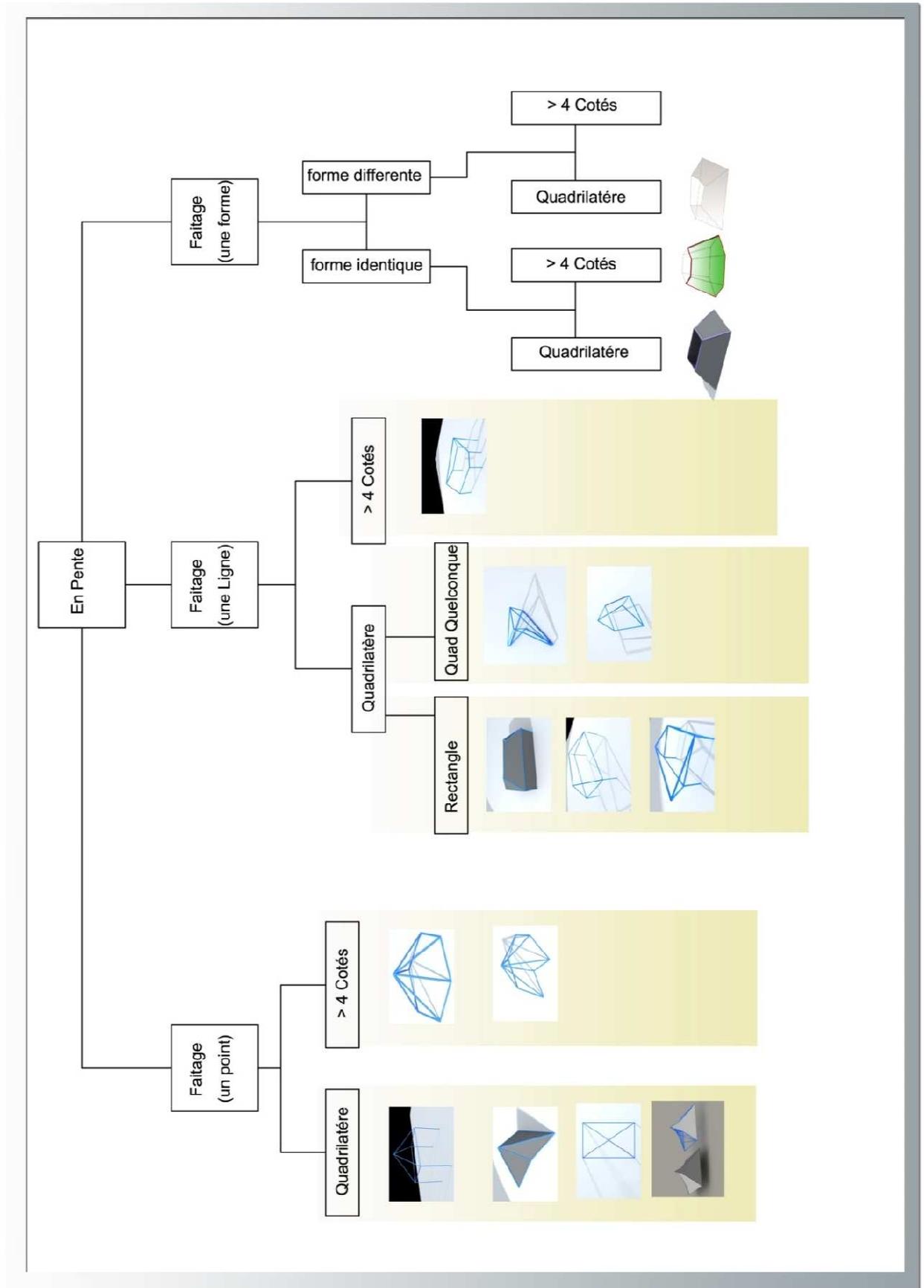
Exemple 1 le passage du toit incliné simple au toit chinois en choisissant un profil en courbe convexe.



Exemple 2 le passage du toit incliné simple au toit impérial en choisissant un profil en courbe concave.

Si on combine ses deux paramètres (le faîtage et la forme de base) avec la possibilité de changer le profil d'égout ou d'arêtier, on obtient cette arborescence concernant le toit en pente (Fig.34). En conclusion, c'est une sous classification des toits simples qui concerne la toiture en pente.

Figure 34 Différents types du TOIT EN PENTE



III. TOIT à Surfaces de révolution

Le toit à surfaces de révolution est une typologie de toitures générée par une fonction spécifique de modélisation géométrique « la révolution ». Les objets générés, par balayage, sont obtenus en faisant tourner une région bidimensionnelle autour d'un axe. La génération de la surface s'appuie sur deux points de pivot (sur la génératrice et sur l'axe) et une fonction radiale. (Voir Fig.35.36.37)

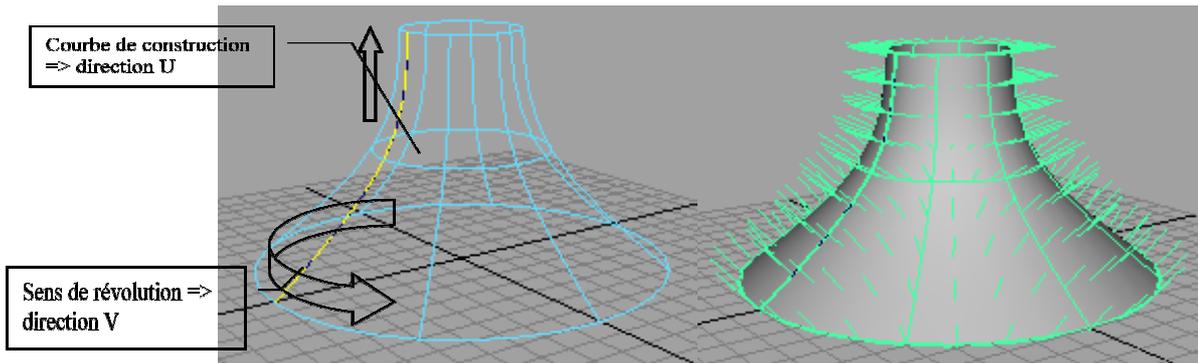


Figure 35 la génération des toits par la révolution



Figure 36 Toit en poivrière généré par la méthode de révolution

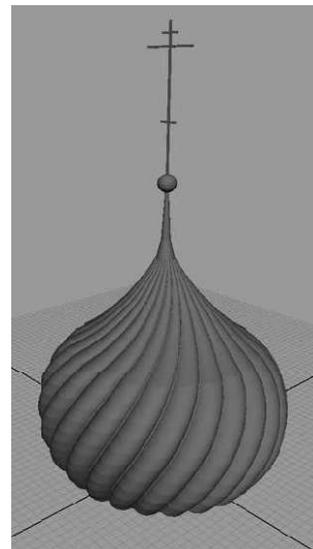


Figure 37 Toit en bulbe généré par la méthode de révolution

VI. TOIT à Surfaces d'extrusion

Le toit à surfaces de révolution est une typologie de toitures générée par l'extrusion. Les fonctions appartenant à cette catégorie sont basées sur le déplacement d'une génératrice le long d'une directrice. On distingue trois représentations principales de ce type (figure38)
 Extrusion translationnel: cette fonction est à l'origine de l'extrusion. Un objet est défini d'une région bidimensionnelle le long d'un vecteur et selon une distance.

Extrusion conique : Ces extrusions à l'origine des formes coniques consistent en un déplacement d'une région bidimensionnelle le long d'un vecteur couplé à un changement d'échelle.

Extrusion composée : Ce type d'extrusion résulte de la combinaison des procédures précédentes. Une rotation et un changement d'échelle peuvent être appliqués à la génératrice tout au long de la directrice. La surface résulte de l'extrusion de la génératrice le long de la directrice et d'une interpolation entre l'état de départ et d'arrivée.

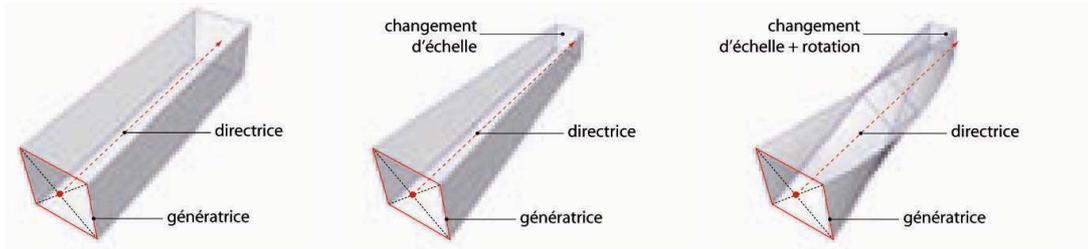


Figure 38 trois représentations principales de l'extrusion



Figure 39 Toiture de la cité radieuse, Le Corbusier, Marseille



Figure 40 l'entreprise Zinco en Allemagne

V.TOIT à Surfaces gauches

Ce sont les toitures qui possèdent une géométrie non standard. On ne peut pas distinguer sa géométrie et par ailleurs sa modélisation est difficile. On ne peut pas nier la possibilité de modéliser cette typologie par l'identification de ses paramètres. La génération de ce type de modèle consomme beaucoup du temps. Et elle peut prendre plusieurs formes: parabolique, conoïde, brisée... (Voir fig.41.42)

On ne va pas l'étudier au cours de ce travail, mais il peut faire l'objet d'une future recherche.

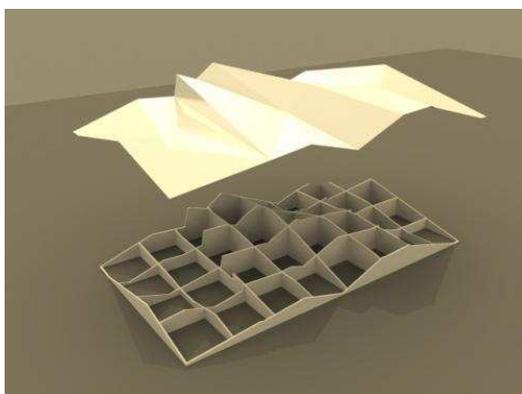


Figure 41



Figure 42 Casa Batlló, Gaudi, Barcelone

C. Toitures composées :



Figure 43 la cathédrale idéale, Viollet-le-Duc, architecture gothique

«Nul doute que la théorie de Viollet-le-Duc est une construction complexe, soucieuse du détail et touchant à bien d'autres domaines de la connaissance, mais elle est entachée d'un bon nombre de prémisses et de conclusions contestables» [Théo03].fig.43

Les toitures composées se forment par l'association de deux ou plusieurs toitures simples.

La toiture simple est le noyau ou l'unité de composition afin de faire naître un toit composé.

Les combinaisons des toits simples sont diverses. On peut citer :

-Superposition c'est le cas du toit Mansart dont la superposition d'un toit à base rectangulaire et à faitage forme identique et un toit à base rectangulaire et à faitage ligne (Voir fig.40)

-accoler : accoler deux toits (Voir fig.41)

-intersection (Voir fig.43)

...etc.



Figure 44 Toit Mansart Superposition de deux toits simples

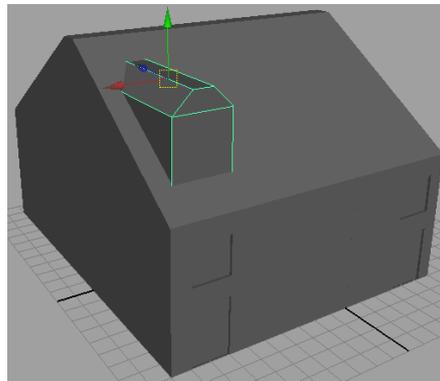


Figure 47 Exemple d'intersection



Figure 46 Toit en Shed deux toits simples accolés

Bilan:

La toiture composée est définie par la combinaison des toitures simples.

Grâce à ces différentes combinaisons, on peut générer la plupart des types des toits. Pour les déterminer, il faut préciser la méthode de composition et ses paramètres.

Alors, il reste à déterminer tous ces points.

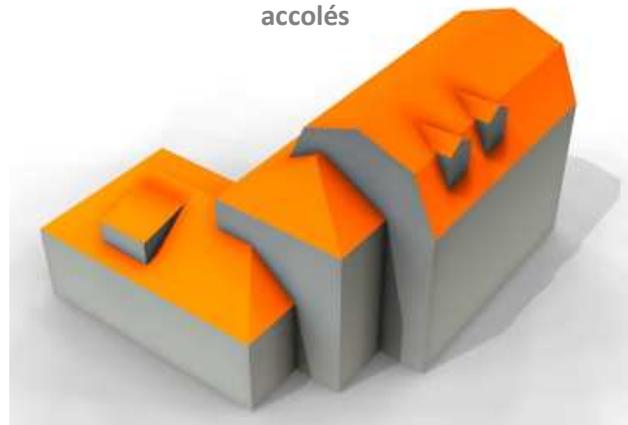


Figure 47 Exemple d'intersection des toits simples pour former un toit composé

4. Conclusion

Le travail développé pendant le stage au sein du CRAI m'a permis d'accéder à un nouveau champ d'application de la modélisation paramétrique après la voute et la coupole. Il m'a donné l'occasion d'étudier et d'analyser la toiture comme élément architectural et de chercher par la suite les méthodes les plus adéquates de modélisation afin de générer un objet paramétré par le **GOP**.

Afin d'accomplir notre objectif, nous avons suivi une démarche bien définie (voir fig.48) et qui consiste à étudier quelques travaux de recherche qui s'intéressent à la toiture, à analyser l'élément architectural pour générer une classification selon des critères spécifiques et de définir son paramétrage par rapport à la modélisation.

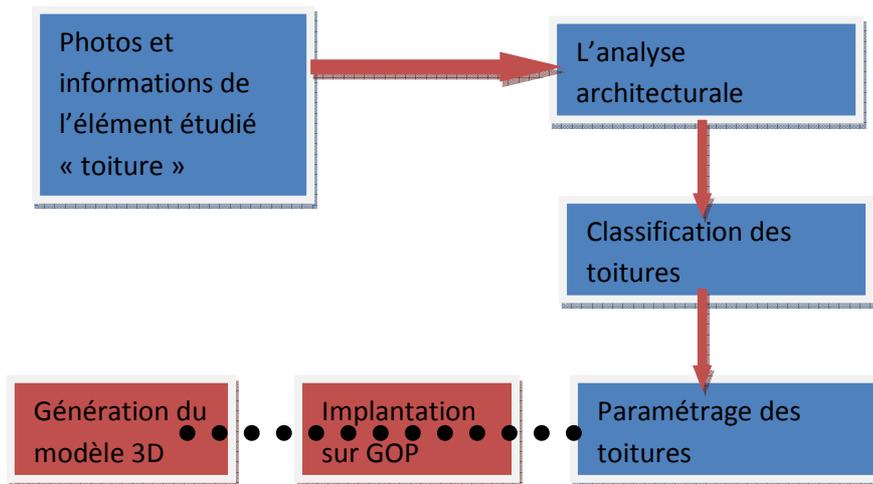


Figure 48 Démarche de reconstruction de l'élément architectural « toiture »

Perspective

Après l'étude de l'élément architectural « toiture » et la définition de ses différents paramètres pour la toiture simple et spécifiquement le toit en pente, je laisse une voie ouverte à la progression et la possibilité de terminer l'étude des autres typologies de toiture. Cependant, je souligne quelques axes d'intérêts pour lesquels je donne quelques propositions qui peuvent faire l'objet d'une future recherche :

- les toitures composées et leurs procédures de composition
- le développement d'une interface graphique, qui rend l'outil plus convivial
- l'implantation sur GOP

Bibliographie

- [T1] l'association ouvrière des compagnons du devoir. Encyclopédie des métiers : l'art du couvreur (3 tomes). Librairie du Compagnonnage, Paris
- [T2] l'association ouvrière des compagnons du devoir. Encyclopédie des métiers : la charpente et la construction en bois (10 tomes). Librairie du Compagnonnage, Paris, 1978
- [T3] Définition selon www.wikipédia.com
- [T4] Paul Jacques Grillo. Form, Function and design. Dover Publications, Inc, New York, 1960
- [T5] André Leroi-Gourhan. Milieu et technique. Éditions Albin Michel, 1992.
- [T6] Rencontre avec l'association Droit au logement Paris 18ème, International Network for Urban Research and Action (INURA), Bulletin n°23: «Caen-Paris 2002 », pp. 4-6. Haut du formulaire Bas du formulaire
- [Théo03] Théorie de l'architecture de la renaissance à nos jours TASCHEN 2003 tome II
- [Ital74] Italo Calvino. Les villes invisibles, traduit de l'italien par Jean Thibaudeau. Éditions du Seuil, Paris, 1974.
- DICOBAT dictionnaire général du bâtiment, Jean de VIGAN E.S.S.E.C, éditions arcature

Articles, Mémoires, Thèses :

- [LIV06] : thèse sur : RELEVÉ ET MULTI-REPRÉSENTATIONS DU PATRIMOINE ARCHITECTURAL
Définition d'une approche hybride de reconstruction 3D d'édifices, Livio DE LUCA, 2006, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre d'Aix-en-Provence.
- [FUC06] : thèse sur : Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique, Alain FUCHS., 2006, laboratoire MAP-CRAI
- [Boehler et al., 2002a] Boehler W., Marbs A. 3D Scanning Instruments. Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfou, 2002
- [CRUZ] Article Reconstruction 3D sémantique d'objets architecturaux, Christophe CRUZ, Franck MARZANI (Laboratoire LeZi, UFR Sciences et Techniques, Université de Bourgogne), Ashish KARMACHARYA, Frank BOOCHS (Institut i3mainz, am Fachbereich I Geoinformatik und Vermessung)
- [LAF05] Article MODELE PARAMETRIQUE POUR LA RECONSTRUCTION AUTOMATIQUE EN 3D DE ZONES URBAINES DENSES À PARTIR D'IMAGES SATELLITAIRES HAUTE RESOLUTION; Florent Lafarge, Xavier Descombes (Projet Ariana - INRIA/13S 2004) Josiane Zerubia, Marc-Pierrrot Deseilligny (Institut Géographique National 2/4 avenue Pasteur 94165 Saint-Mandé, France), 2005
- [MUL06] Article mueller.procedural_modeling_of_buildings. Pascal Müller, Simon Haegler, Andreas Ulmer, ETH Zürich, Peter Wonka, Arizona State University, Luc Van Gool, ETH Zürich / K.U. Leuven / SG 2006.
- [CHEV08] Chevrier, C. and Perrin, J.P., 2008. Interactive parametric modelling: PO3 a tool for the cultural heritage monument 3D reconstruction. CAADRIA conference Chiang Mai, Thailand, April 9-12 2008, to appear.
- [Naj99] thèse Reconstruction tridimensionnelle de tissus urbains, Najla Allani-Bouhoula 1999, laboratoire CRAI.
www.autodesk.com/buildinginformation

CHAPITRE 2 l'état de l'art

Fig. E1 [CRUZ]	P5
Fig. E2/E3/E4 travail de photogrammétrie (église sainte Maurice Strasbourg) effectué par Belhadj bessem et Gallas Mohamed anis, Master MSEB.....	P6
Fig. A1 [LAF05]	P7
Fig. A2/A3/A4 [LAF05]	P8
Fig. A5/A6/A7 [MULO6]	P9
Fig. A8 [MULO6]	P10
Fig. A9 www.autodesk.com/buildinginformation	P10
Fig. A10/A11 [CHEV08]	P11

CHAPITRE 3 Contexte de l'étude

Fig.1 LA TOITURE ET SES ÉLÉMENTS fiche thématique5 p-1; Fiches-Drouais-Thematic-AF07; auteur: BCanard www.pays-drouais.com	P13
Fig.2 LA TOITURE ET SES ÉLÉMENTS fiche thématique5 p-2; Fiches-Drouais-Thematic-AF07; auteur: BCanard www.pays-drouais.com	P14
Fig.3: http://ouvertures.info/opinion/pagodes-humanisme-et-libertes	P14
Fig.4: http://www.duanrevig.com/Moscou/Basile%20le%20Bien%20Heureux%20xomme%20un%20gros%20gateau_JPG_orig.html	P14
Fig.5 http://www.ville-negrepelisse.fr/fr/accueil/vie-municipale.html	P14
Fig.6 [MULO6]	P15
FIG.8 http://www.quebecurbain.qc.ca/archives/_mg_9593.jpg	P16
FIG.9 www.dictionnairevisuel.com	P16
FIG.10 www.wikipédia.com	P17
FIG.11 www.dictionnairevisuel.com	P17
Fig.12 DICOBAT dictionnaire général du bâtiment, Jean de VIGAN E.S.S.E.C, éditions arcature p-240.....	P18
Fig.13/14 www.dictionnairevisuel.com	P18
Fig.19 http://www.e-toiture.com	P19
Fig.20 ww.dictionnairevisuel.com	P20
Fig.35 Cours maya La modélisation NURBS INTRODUCTION AUX SURFACES Perrin, J.P, Nancy 2008.....	P30
Fig.36 www.dictionnairevisuel.com	P30
Fig.37 GENERATION OF ARCHITECTURAL PARAMETRIC COMPONENTS Chevrier, C. and Perrin, J.P., 2009.....	P30
Fig.39 http://www.routard.com/photos/marseille/34279-toit_cite_radieuse.htm	P31
Fig.40 http://www.phitoussicom.com/wp-content/uploads/2008/02/jardin-sur-toit.jpg	P31
Fig.41 http://forum.aroots.org/mesimages/5125/ACCamera_4.jpg	P31
Fig.42 http://farm1.static.flickr.com/210/472237551_ebae528473.jpg	P31
Fig.43 Théorie de l'architecture de la renaissance à nos jours TASCHEN 2003 tome II p-234.P32	P32
Fig.44/46 ww.dictionnairevisuel.com	P32