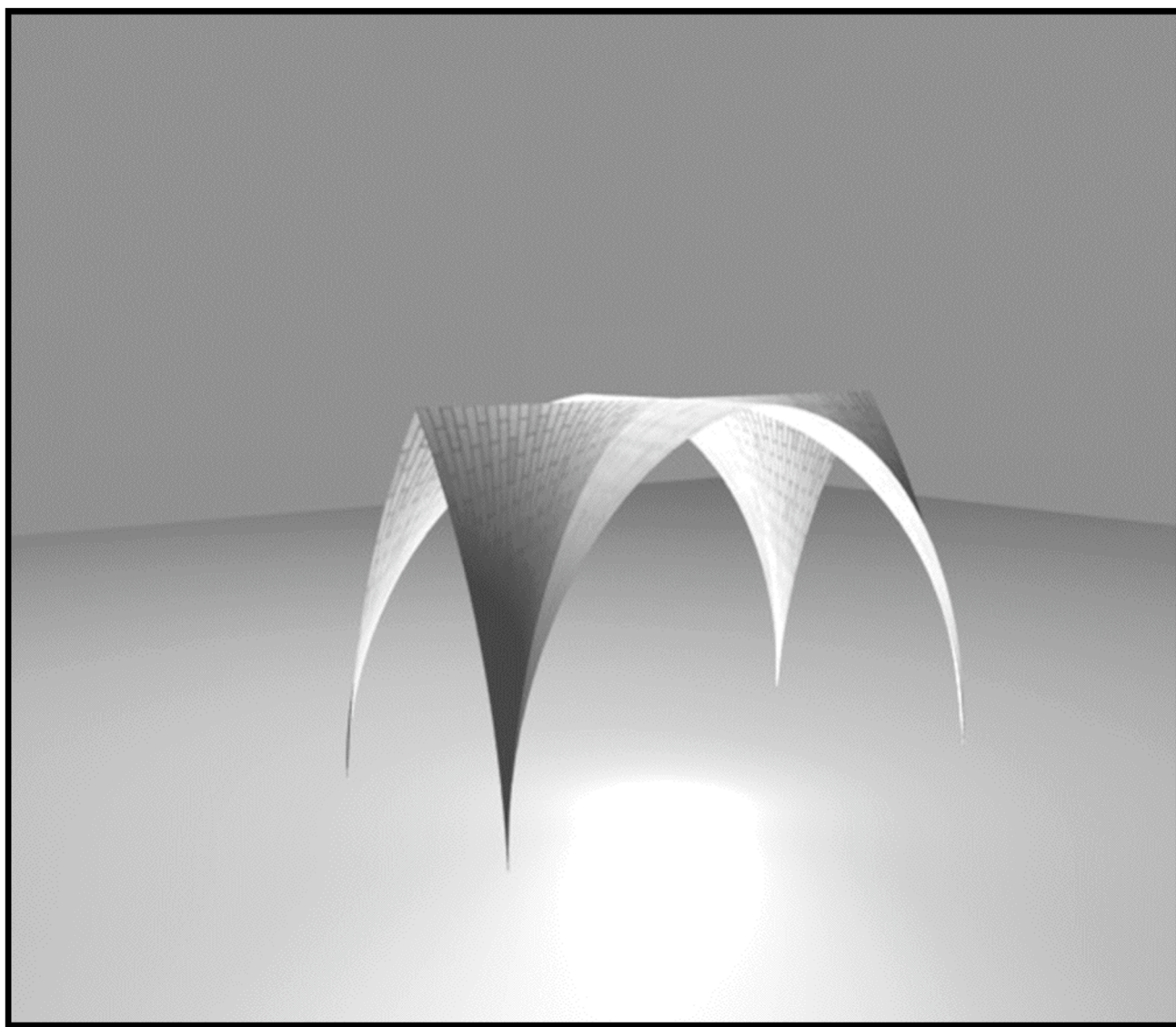


Université Henri Poincaré
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
École Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg
Institut National Supérieur des Sciences Appliquées de Strasbourg
Institut National Polytechnique de Lorraine



Sommaire

Introduction	3
Chapitre I : Contexte de travail et problématique	4
Introduction	4
I. Contexte de travail.....	4
1-Notion de modèle.....	5
2-La modélisation en architecture	5
2.1. Le modèle « reconstitution »	6
2.2. Le modèle « tel que construit »	6
2.3. Le modèle « tel que saisi »	6
3-Les objets paramétrables :	6
4Technique d'acquisition.....	6
4.1.-Aperçu historique du relevé	6
5-La photogrammétrie.....	7
5-1-1Définition.....	7
5.1.2La stéréophotogrammétrie.....	7
5.1.3. Images rectifiées	7
5.1.4. Ortho-image	7
5.1.5. Multi image	8
6.Le relevé laser :	8
6.1.Traitement des données	8
6.2.La segmentation	9
6.3. Le maillage.....	9
Conclusion.....	9
II. Problématique.....	10
1.Choix du sujet d'étude	10
2.Aperçu historique du style gothique.....	10
2.2.Le premier bâtiment gothique.....	11
2. 3. Les mouvements :	12
2.3.1.Le gothique primitif(~1140 à 1190) :.....	12
2.3.2.Le gothique classique (~1190-1240) :.....	12
2.3.3.Le gothique rayonnant (~1240 -1350):	12
2.3.4.Le gothique flamboyant (~1350-1500):	12
3.Principales caractéristiques stylistiques :	13
4. Choix : de l'objet d'étude	13
Conclusion.....	14
ChapitreII : état de l'art.....	15
Introduction	16
2. Modélisation géométrique selon une connaissance architectural.....	17

Mémoire Master MSEB Modélisation paramétrique d'une voûte gothique

3. Travail accompli sur la modélisation voûte gothique.....	20
ChapitreIII : CORPS DU TEXTE	21
Introduction :	21
I- Etude de la voûte gothique :.....	22
1.Définition :	22
2.étude à l'échelle de la voûte gothique	23
2.3.Les profils des arcs.....	25
3. ETUDE DU PLAN	32
4. Organigramme typologique.....	32
II. Paramétrage de la voûte sur plan rectangulaire.....	33
1 Les éléments principaux (Paramétrage du tracé des arcs).....	33
2.Les profils.....	38
3.Les éléments secondaires.....	40
4.les clefs	40
5.l'ogive diaphragme	45
6. La trompe de voûte	46
Conclusion.....	46
CONCLUSION GENERAL	48
Tables des figures	50
Bibliographie	52
Glossaire.....	54

Introduction

De nouvelles techniques d'acquisitions permettent d'avoir un relevé précis, d'édifices architecturaux, ou de vestiges anciens, ce qui a intéressé de nombreux archéologues et architectes soucieux de préserver un patrimoine disparu ou excitant.

À l'aide d'outils modernes notamment les scanners lasers, la photogrammétrie, autre que le relevé traditionnel métrique, croquis, et relevé à partir de plans anciens. Le résultat des ces relevés, une importante quantité de données qui se matérialisent en nuages de points. La difficulté réside dans la modalisation à partir de ces nuages points, car l'opération reste lente et fastidieuse.

Pour cela on a développé au sein du laboratoire du CRAI à l'école d'architecture de Nancy un axe de recherche nommé « modélisation paramétrique ». A travers l'étude de règles architecturales, et des connaissances archéologiques ont permis de concevoir des modèles 3D paramétrés, qui pourront s'adapter aux nuages de points, en faisant varier les différents paramètres.

Le présent rapport traite de la voûte gothique, c'est une étude exploratoire architecturale de cet élément, qui nous a permis de déduire les primitives architectoniques lui correspondants, afin d'identifier les paramètres qui serviront pour développer le modèle 3D de la voûte gothique.

Chapitre I : **Contexte et** **Problématique**

Introduction

Nous abordons dans ce chapitre quelques définitions dans le cadre de notre axe de recherche tels que : La notion de modèle en architecture, l'objet paramétrés, les techniques de relèves. Ainsi qu'une problématique justifiant notre choix pour "La Voûte gothique».

I. Contexte de travaille

1-Notion de modèle

- Ce qui sert ou doit servir d'objet d'imitation pour faire ou reproduire quelque chose. Objet de même ne forme qu'un objet plus grand mais exécuté en réduction. Voir maquette.[ROB88]
- Le modèle est d'abord la « maquette », l'objet réduit et manipulable qui produit en lui sous une forme simplifiée, « miniaturisée », les proportions d'un objet de grandes dimensions, qu'il s'agisse d'une architecture ou d'un dispositif mécanique. L'objet réduit peut être soumis à des mesures, des calculs, des tests physiques qui ne sont pas appliqués commodément à la chose produite. [...] La notion de modèle est associée à une idée de simplification systématique. [UNI95]

Ainsi le modèle reprend les propriétés ainsi que les caractéristiques de l'objet original selon sa destination. Si nous l'utilisons aux domaines de l'architecture et de l'archéologie, nous pouvons le définir comme une représentation d'un objet en volume à une échelle définie.

2-La modélisation en architecture

Si la méthodologie de modélisation constitue une constante, sa formalisation varie. En effet nous distinguons 3 types de modèles : la reconstitution, le modèle « tel que construit » et le modèle « tel que saisi ».

2.1. Le modèle « reconstitution »

En archéologie, le modèle 3D est souvent utilisé pour la représentation des reconstitutions de vestiges en états fragmentaires, nous parlons alors de modèle 3D de restitution. Ainsi le relevé seul peut s'avérer insuffisant, donc des connaissances préalables sont nécessaires afin de concevoir le modèle, notamment des règles et des connaissances architecturales et archéologiques, qui permettent de valider des hypothèses émises lors de la modélisation pour finaliser le modèle dit: de reconstitution.

2.2. Le modèle « tel que construit »

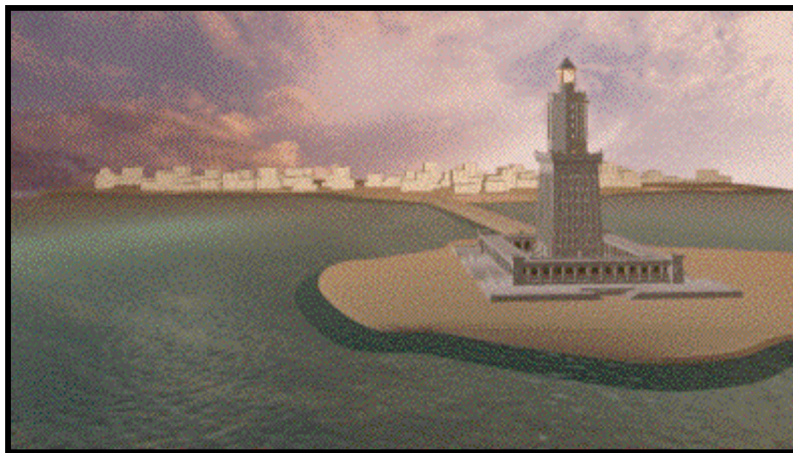


Figure 1. Modèle de reconstitution du phare d'Alexandrie

A la différence de la reconstitution, il modélise sur la base de connaissances propre à l'objet et des mesures effectuées sur lui sans aucune hypothèse ou extrapolation. Il permet de représenter l'objet relevé tel qu'il a été conçu.

Par exemple il peut représenter un modèle d'édifice sans l'effet de l'érosion ou des défauts mineurs causés par le temps.

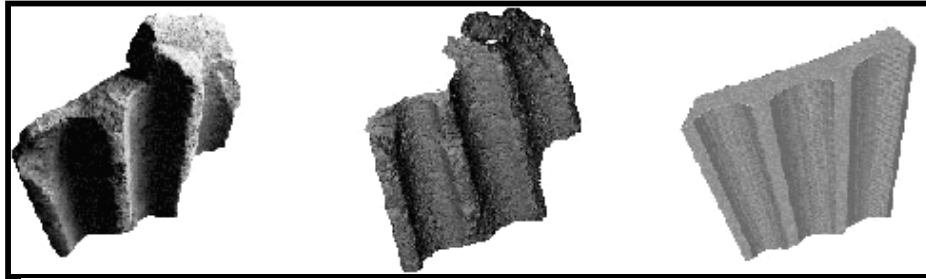


Figure 2. Objet réel

Modèle tel que saisi

Modèle tel que construit

2.3. Le modèle « tel que saisi »

Il représente l'objet tel qu'il existe au moment du relevé. Les informations nécessaires à sa construction sont tirées uniquement du relevé de l'objet lui-même. C'est la modélisation la plus fidèle à l'objet mesuré, ainsi le modèle est dépendant de la qualité et précision du relevé.

3-Les objets paramétrables :

Les recherches effectuées dans le domaine des objets paramétrables à l'architecture et plus rarement à l'archéologie, on les trouve dans des logiciels commerciaux dans le domaine de la construction, mais une application aux nuages de points est encore au domaine théorique. Ainsi un grand ensemble d'outils de CAO se base sur la manipulation d'éléments architecturaux (murs, plancher, toitures, poteaux, fenêtres...), pour la construction de modèles 3D. Cette démarche se base sur la construction d'une structure complexe à partir des éléments simples qui la composent.

Cette approche ascendante manipule donc un ensemble d'éléments nommés objets paramétrables ; ce sont des entités élémentaires pouvant faire l'objet d'une description géométrique simple et adaptative qui peut être renseignés par la manipulation de paramètres tels que l'orientation, les dimensions, les couleurs, les textures, etc. ...).

4. Technique d'acquisition :

Nous abordons dans cette partie un aperçu sur les nouvelles techniques utilisées pour le relevé en architecture qui appartiennent essentiellement à deux grandes familles : la photogrammétrie et le relevé laser.

4.1. Aperçu historique du relevé

De tout temps le relevé en architecture s'est fait à l'aide de dessin et de croquis à la main. Mais avec l'évolution des sciences et des techniques, l'homme a découvert de nouveaux outils qui lui ont permis d'avoir des relevés justes et corrects, palliant ainsi les erreurs dues à l'illusion optique et aux erreurs de dessin.

On trouve les premières méthodes développées à la renaissance en l'occurrence :

- le miroir de Brunelleschi¹, le châssis à réseau de Dürer², et la vitre italienne, qui inspireront la photogrammétrie,
- les théories d'Alberti sur la perspective qui seront utiles pour le développement d'appareils de mesure comme le théodolite et le télémètre laser.

¹ Filippo Brunelleschi, né en 1377 à Florence et mort en 1446 est un peintre, un orfèvre, un architecte florentin

² Albrecht Dürer, né le 21 mai 1471 et mort en 1528 à Nuremberg est un peintre, graveur et mathématicien allemand

5. La photogrammétrie

5.1 Définition

« La photogrammétrie est une technique de mesure par laquelle les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet sont déterminées par des mesures faites sur une ou plusieurs images photographiques prises à partir de positions différentes »³

On distingue deux photogrammétries : rapprochée et aérienne. Cette distinction est due au domaine d'utilisation, cependant son développement était principalement dû à l'aérienne car elle permettait aux militaires d'établir des cartes d'où son importance stratégique.

5.2 La stéréophotogrammétrie

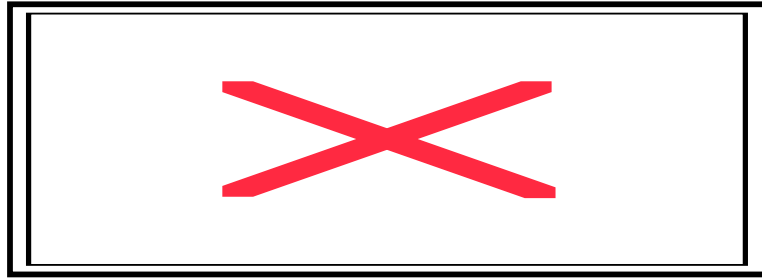


Figure 3. Vue stéréoscopique du Taj Mahal (1906)

Utilisée dès le début du XX^{ème} siècle en photogrammétrie, le principe de la stéréophotogrammétrie repose sur la capacité du cerveau humain à créer une vision stéréoscopique : il reconstitue une vision en relief à partir du champ de chevauchement de vues légèrement décalées. Ainsi deux clichés photographiques parallèles et légèrement décalés constituent un couple stéréoscopique et la technique qui les emploie s'appelle la stéréoscopie binoculaire. Puis avec l'avènement de l'air numérique on assiste à l'apparition de la "La stéréophotogrammétrie numérique"

5.3. Images rectifiées

Ce sont des images photographiques dont les effets de perspective et les déformations dues aux distorsions de la focale sont corrigées afin de pouvoir prendre des mesures justes, il est préférable de traiter la partie centrale de la photo car elle subit moins de déformations. En outre la rectification de la photo se fait à l'aide seulement de quatre points.

5.4. Ortho-image

Produit du développement technologique et numérique elle se définit comme une vue orthogonale de l'objet selon une direction de projection. Elle est composée de plusieurs morceaux d'images correspondant chacune à une projection différente.

Permettant d'avoir des mesures très justes comparé à l'image rectifiée. On peut la définir comme une mosaïque de plusieurs images rectifiées en fonction de tous les plans correspondant à l'objet.

La fabrication d'ortho-photo nécessite un nombre conséquent d'images, car il faut voir tous les plans constituant la partie visible de l'objet, et ce dans une orientation la plus favorable [AND05]. Nous concluons que pour pouvoir rectifier chacune des portions de l'image il faut en général 3 points, ce qui nous donne une quantité de points importante.

5.5. Multi image

³ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photogramme%C3%A9trie>

Cette méthode consiste à prendre plusieurs images convergentes vers l'objet qu'on veut modéliser, avec une grande surface de recouvrement, entre chaque deux photos le minimum acceptable est de 60%, qui nous donne comme résultat un bloc d'images ; puis on détermine des points qui

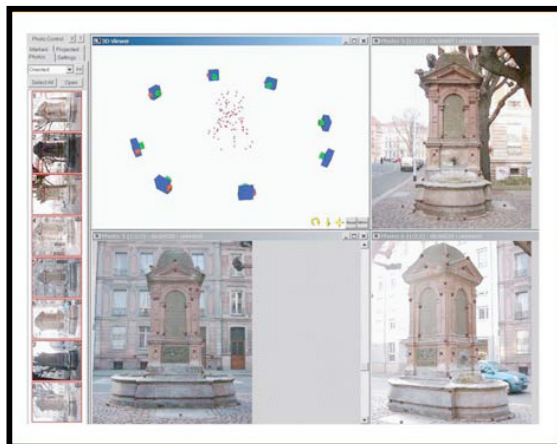


Figure 4. Interface de Photomodeler

se trouvent dans les surfaces de recouvrement comme **points à trois dimensions**, toutefois ces points doivent correspondre dans trois photos au moins pour qu'on puisse manuellement les pointer, afin de construire dans un logiciel tel que Photomodeler⁴ un nuage de points qui correspond à notre objet.

Remarque :

Parmi les des techniques photogrammétrique, la représentation multi-images se présente comme un outil intéressant pour le relevé dans l'optique de développer notre outil de modélisation.

Cependant l'acquisition des données se fait manuellement à travers des points tridimensionnels, ce qui augmente le risque d'erreur, mais aussi la focal des appareils utilisées.

Ainsi on a choisi de paramétrer notre sujet d'étude dans le but de traiter des données de relevés lasers, car le mode d'acquisition et de traitement des données se fait automatiquement donc moins d'erreurs.

6. Le relevé laser :

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. [FUC06]

puis à partir de données on procède aux un traitements des données :

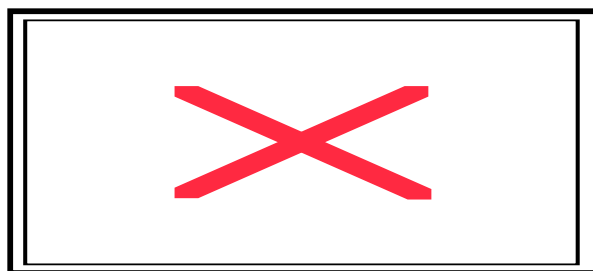


Figure 5. Trois modèles de capteurs laser à temps de vol, de gauche à droite : le LEICA HDS2500, le RIEGL LMS Z90, le TRIMBLE GSX qui est une version évoluée des série GS de la société MENSU.

⁴ **PhotoModeler**, d'Eos Systems, est un logiciel d'aide à la construction de modèles 3D à partir de photos. La saisie, qui se fait grâce à un appareil photo ou une caméra

6.1. Traitement des données

-Ainsi l'appareil transmet à un logiciel de traitement de données les informations recueillies à travers différents points de vues, qui identifie chaque point mesuré de manière à avoir comme résultat un nuage de points pour chaque vue.

6.2. La segmentation :

C'est la division du nuage de points consolidé en sous-ensembles cohérent qui représentent des parties de l'objet relevé, ou l'environnement.

Cette étape est nécessaire pour manipuler, référencier et hiérarchiser géométriquement les

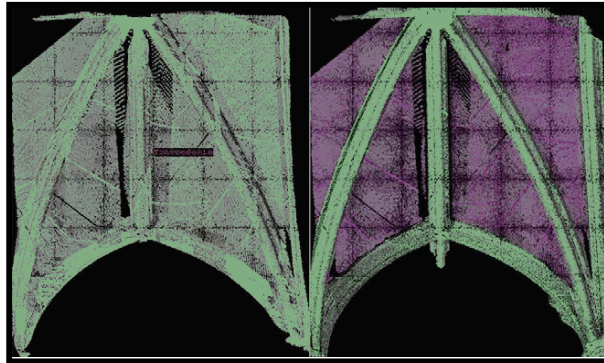


Figure 6. Segmentation (salle capitulaire, Figeac), Map-Crai Nancy

données afin de pouvoir l'exporter dans un logiciel tiers, pour le traiter voir les modélisées car le nuage sans segmentation serait difficile à manipuler vu la quantité de données, toute fois la segmentation de sous-ensembles de point homogène en densité facilite une éventuelle application du "maillage".

6.3. Le maillage

Également appelé facettisation ou polygonisation, le maillage constitue l'étape la plus adaptée au traitement des nuages de points pour obtenir une visualisation complète où une surface remplace les points [fuch06].

A partir d'un algorithme qui permet de créer des facettes entre les points du nuage par triangulation et par calcul d'approximation des moindres carrés. Cet outil est adapté à des objets sculptés comme les statues, et détails architectoniques, par contre son utilisation pour des objets à grande échelle nécessite une optimisation mathématique de ces maillages car la quantité de données relevées est très lourde à gérer pour les logiciels actuels.

Conclusion

L'utilisation de nouvelles techniques pour le relevé tels que la photogrammétrie multi images ou le relevé laser permettent d'acquérir une quantité importantes de donnée mais paradoxalement la modélisation reste délicate notamment à partir des nuages de points résultants, d'où la nécessité d'en extraire les données pertinentes, logiques afin de faciliter la modalisation. Notamment à l'aide de nos modèles paramétrés.

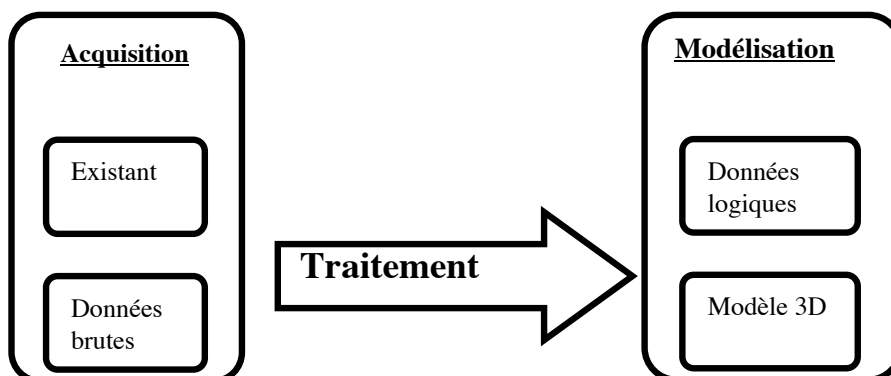


Figure 7. Méthodologie générale de construction d'un modèle 3D dans la chaîne d'acquisition et de modélisation 3D.

II. Problématique

1. Choix du sujet d'étude

Parmi les choix de stages proposés au laboratoire du CRAI le thème « La modalisation paramétrique » qui a pour but de modéliser des objets architecturaux de manière paramétrée a retenu mon attention, facilitent la modélisation à partir de divers sources nuages de points photos plans relevés.

Dans ce contexte il fallait trouver un sujet d'étude, nous avons décidé d'étudier le style gothique, qui se présentait comme un choix intéressant d'une part à cause d'une demande évidente de la part des architectes et archéologues, causée par la difficulté et même la lenteur de la modélisation 3D, de modèles qui servent comme maquette visuelle ou d'étude, dans le cadre de la préservation du patrimoine

Et d'autre part ce style est paramétrable car il est soumis à certaines règles bien distinguées et établies.

2. Aperçu historique du style gothique

2.1. Définition -[AUB.43]

L'art gothique est l'art qui, né en France au milieu du XII^e siècle, dominera en Europe pendant tout le moyen âge jusqu'au milieu du XVI^e siècle.

Ce terme est employé pour marquer la différence avec l'art roman dont la caractéristique essentielle est l'ogive. On doit ce terme à Giorgio Vasari (1511-1574), architecte et écrivain italien, vivant dans la mouvance des Médicis à Florence.

On peut reprocher à ce terme d'avoir eu à son origine un sens péjoratif : les gens de la renaissance l'employèrent pour marquer leur dédain de l'art du moyen âge. Les autres termes proposés par les archéologues sont malheureusement fautifs, comme ogival, ou insuffisant, comme français. Ce dernier a été employé dès le moyen âge : <<opus francigenum >>

Nous conserverons donc le terme gothique, qui est universellement accepté et qui n'a plus aujourd'hui le sens péjoratif qu'on lui avait donné primitivement ; personne ne confond plus « l'art gothique » avec « l'art des goths », que l'on appelle plus généralement < art des barbares >>

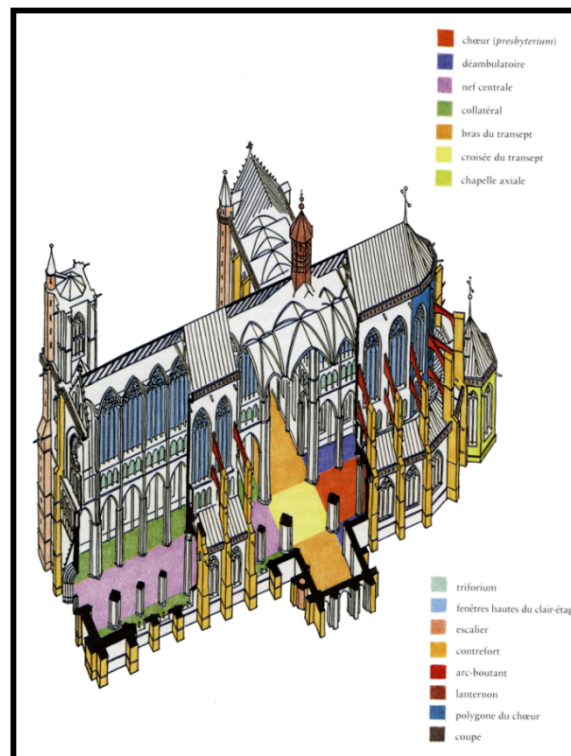


Figure 8. Représentation d'une basilique gothique

7. 3. Les mouvements :

7.3.1.Le gothique primitif(~1140 à 1190) :

le gothique primitif se dessine essentiellement à travers deux édifices : la basilique Saint Denis et la cathédrale de Sens.

- A Saint Denis, le double déambulatoire révèle la liberté laissée par les croisées d'ogives.
- A Sens, on remarque : l'alternance des supports piliers forts et faibles, une voûte sexpartite, un éclairage fourni par les grandes baies des bas-côtés.

7.3.2.Le gothique classique (~1190-1240) :

Les deux édifices les plus marquants de cette période sont Chartres et Bourges. A Bourges est adoptée une élévation pyramidale à cinq niveaux, permise par l'utilisation de doubles collatéraux

7.3.3.Le gothique rayonnant (~1240 -1350):

L'origine du gothique rayonnant peut être située à Paris. La basilique de Saint Denis fait figure de précurseur. On constate :

- la virtuosité des remplages, une verticalité accrue, des piliers fasciculés et l'édification de murs de verre. On trouve un triforium à claire-voie. murs de verre dans la Sainte Chapelle.
- Parties hautes du choeur à Beauvais, façade occidentale à Reims.
- la rose devient un élément incontournable du décor, même si elle était déjà très utilisée.
- La multiplication des chapelles latérales.

7.3.4.Le gothique flamboyant (~1350-1500): Le terme de flamboyant est dû à la forme de flamme des remplages des baies (notamment des roses). On multiplie les gâbles et les pinacles à l'extérieur, tandis qu'à l'intérieur les voûtes deviennent très complexes, avec des combinaisons de tiercerons, de liernes. Des élévations à deux niveaux qui font disparaître les murs entre les grandes arcades et les baies supérieures, certains éléments d'architecture gothique sont utilisés à des fins essentiellement décoratives. C'est le cas des croisées d'ogives qui se complexifient jusqu'à perdre leur sens. On leur adjoint des clefs de voûtes pendantes qui peuvent menacer la stabilité de l'édifice.



Figure 11.Chapelles de Senlis
(gothique flamboyant)

8.Principales caractéristiques stylistiques :

L'architecture –et avant tout, l'architecture religieuse- domine l'art du moyen âge. C'est elle qui règle l'évolution de la sculpture, de la peinture et des arts industriels.

Les caractères de l'architecture gothique sont les suivants :

- 1- Emploi de la voûte sur croisée d'ogives.

- 2- Emploi systématique de l'arc brisé au lieu de l'arc en plein cintre.
- 3- Emploi de l'arc –boutant pour étayer la maîtresse voûte.
- 4- Emploi de nouvelles formes de mouluration et de la décoration.

9. Choix : de l'objet d'étude

L'architecture Gothique se révéla riche en éléments, et en objets architectoniques. Il fallait cerner les éléments qui paraissaient potentiellement Paramétrable dans l'architecture gothique. Nous avons défini plusieurs éléments qui pouvaient faire l'objet études car ils sont soumis à des règles bien précises : la voûte d'ogive, l'arc-boutant, les colonnes, les fenêtres, les corbeaux , profils d'ogives ou de bases de piles.

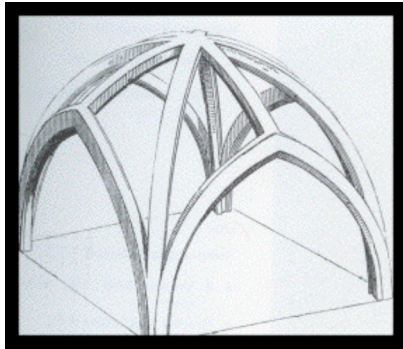


Figure 12.Voûte

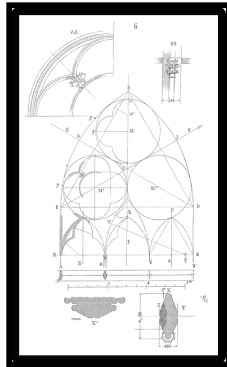


Figure 14.fenêtres

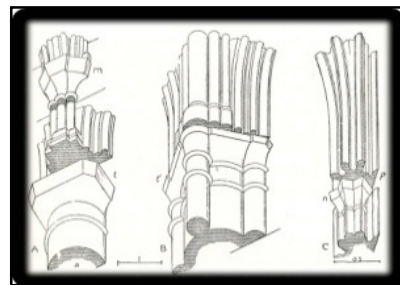


Figure 13.Piles et chapiteaux

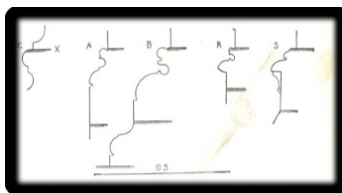


Figure 16.Profiles bases de piles

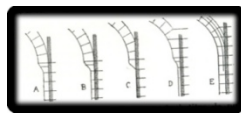


Figure 15.Corbeaux

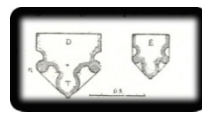


Figure 17.Profils d'ogives

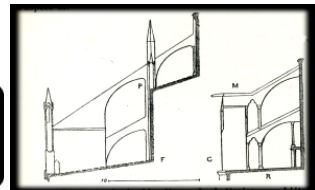


Figure 18.Arcs-boutants

Cependant le sujet est apparu trop riche et vaste pour un stage de master de recherche alors nous avons choisi quelque éléments pour les paramétrer et valider la méthode
-« Le progrès qui signale l'époque gothique consistera surtout à résoudre d'une façon méthodique et définitive le double problème de l'appareil des voûtes à pénétrations et de leur équilibre : l'architecture gothique tranchera les difficultés d'appareil par l'emploi des voûtes nervées , les question d'équilibre par l'emploi de l'arc-boutant .C'est par cette double innovation que l'église gothique va se distinguer de l'église romane telle que les derniers architectes clunisiens l'avaient conçue . L'histoire de la construction gothique sera celle de la nervure et de l'arc-boutant » [AUB.43]

Alors deux éléments se démarquèrent qui symbolisent le style gothique : l'Arc-boutant et la voûte d'ogive.

Cependant la voûte nous est apparue être comme un élément plus régulier par rapport au premier d'une cathédrale à une autre, et d'une région à une autre.

Ces changements étaient justifiés par le besoin des concepteurs de ces édifices d'affirmer leurs pouvoirs religieux à travers une architecture de plus en plus monumentale et même complexe. Cela se justifiait aussi par un besoin d'exprimer un art religieux fort qui incita les maîtres maçons à se surpasser et être de plus en plus innovateurs et créatifs.

Conclusion

On a choisi de paramétrer la voûte gothique qui symbolise ce style architectural ouvrant ainsi un nouveau champ de recherche dans le cadre de la "modélisation paramétrique" au sein du laboratoire "CRAI".

Chapitre II :

État de l'art

Introduction

Dans ce chapitre nous abordons en premier les outils informatiques utilisées dans la modélisation, ensuite des exemples de modélisation géométrique selon une connaissance architectural, et de quelques travaux accomplie sur la voûte gothique.

1. Modélisation informatique :

1.1.Principaux outils

Les logiciels de modélisation ont évolué d'une description mathématique de l'objet pour arriver à la synthèse d'image photo réaliste.

A travers la géométrie **fil de fer** c'est un « modèle 3D qui est décrit par tous les points et toutes les lignes qui le composent. » [GDC.07], l'objet est défini alors par ses sommets, et les arêtes qui joignent ces sommets.

Puis vers des **modèles surfaciques**« modèle 3D qui est décrit par un ensemble de surfaces, dans lequel l'objet ouvert ou fermé est vide et à partir duquel il est possible de générer une représentation ligne cachée ou avec traitement des surfaces. [GDC.07]. Un modèle est dit surfacique c'est comme tendre une peau entre des entités filaires.

Enfin **volumiques** c'est une description géométrique et topologique d'objets solides. la construction de l'objet se fait par : instanciation de primitives paramétrables, arbre de construction CSG⁶, représentation par frontière "B-Rep"⁷, énumération spatiale⁸, construction par déformation.

1.2. La modélisation géométrique pour le relevé

La modélisation géométrique utilise les nuages de points comme support pour la réalisation de modèles tels que construits. Elle se fait selon différentes méthodes, souvent complémentaires :

1.2.1. Modélisation à base de primitives géométrique

La modélisation à base de primitives géométriques est basée sur une série de primitives géométriques (point, segment, courbe, boîte, cylindre, etc.). Nous pouvons constater que cette méthode reste longue et délicate quand le modèle est complexe.

1.2.2. Modélisation par reconnaissance automatique et reconstitution

La modélisation par reconnaissance automatique et reconstitution, basée sur des outils de géométrie différentielle, permet la segmentation automatique de nuage de points [GOU99]. Cette méthode permet de repérer des objets tels que les tuyauteries et pipelines qui sont de formes cylindriques, dans le nuage de points et de les transformer en surfaces ou solides. Cependant l'utilisation de cette méthode n'a pas encore été appliquée afin de l'appliquer à des relèves architecturaux ou archéologiques.

1.2.3. Modélisation à partir de bibliothèques « métier »

La modélisation à partir de bibliothèques « métiers » paramétriques, est basée sur une logique de modélisation à partir d'objets prédéfinis selon des tables de normalisation en vigueur dans divers corps de métier. [FUC06].

Cette méthode est la plus intéressante. En revanche la bibliothèque dite architectural reste à définir car les modèles 3d d'objets architecturaux sont rares.

2. Modélisation géométrique selon une connaissance architectural

2.1. Exemple : un formalisme générique pour la description d'éléments moulurés

Pour l'étape de **modélisation géométrique**, il s'agit d'abord d'isoler de l'observation de l'objet la nature géométrique des éléments qui le composent et de définir des procédures appropriées pour leur reconstruction. Dans le cas spécifique des éléments typés (bases, chapiteaux, moulures, etc.) il s'agit, entre autre, à partir d'une analyse des traits 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 d'instanciation de primitives. [LIV06]

Livio de luca, dans son travail de modélisation géométrique d'un chapiteau d'une colonne d'ordre classique, procède à l'aide de combinaisons de primitives géométriques paramétrées représentant des moulures pour construire un profil, qu'il a défini comme "atomes géométrique". Ces primitives sont le résultat de la variation des paramètres tels que "point de control, hauteur, largeur, rayon...etc", construisant ainsi un profil générateur, afin de créer des faces en extrudant. Enfin il assemble les faces pour avoir le volume du chapiteau dorique.

⁶ En infographie, la **géométrie de construction de solides** (CSG en anglais: Constructive Solid Geometry) est une branche de la modélisation de solide (ou modélisation 3D). Cette géométrie concerne la représentation d'objet solide comme une combinaison d'objets solides simples [WIK07]

⁷ Technique de modélisation volumique permettant de représenter un objet par un ensemble de surfaces délimitant celui-ci

⁸ Découpage de l'espace tridimensionnel en cellules élémentaires. L'objet est alors modélisé en marquant les cellules qui le composent. Chaque cellule peut alors être décomposée pour offrir une précision supérieure ici l'espace est décomposé en cubes

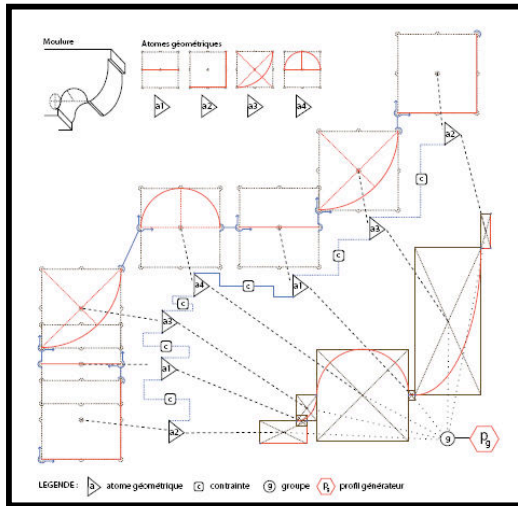


Figure 20. Construction d'une moulure par combinaison mécanique d'atomes géométriques

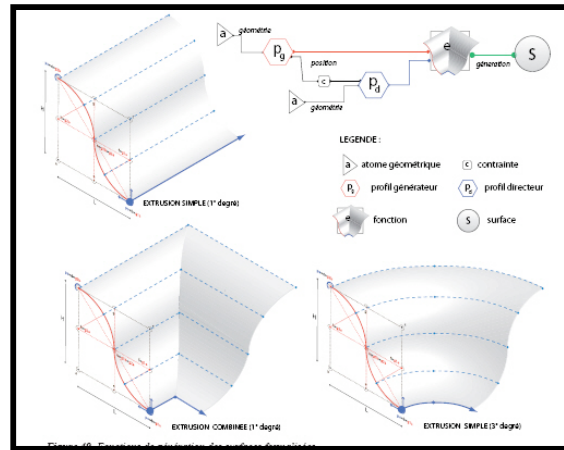


Figure 19. Fonctions de génération des surfaces formalisées

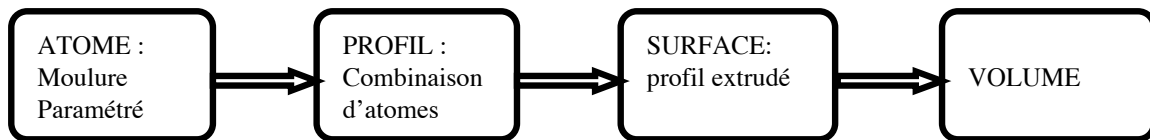


Figure 21. Principe de modélisation

Cependant il ajoute à la modélisation géométrique une description sémantique à l'aide d'un **langage architectural** extrait de traités de Palladio qui permet d'assigner un terme architectural aux parties du profil selon une division verticale.

- Le terme architectural identifiant une moulure indique en effet une transition dans la surface de l'élément, mais il ne spécifie pas avec précision son périmètre spatial ni tous les atomes géométriques qui lui appartiennent.

Nous en déduisons qu'une description sémantique est relative à une représentation mentale de la forme ou à un mécanisme permettant d'en extraire des concepts [LIV06].

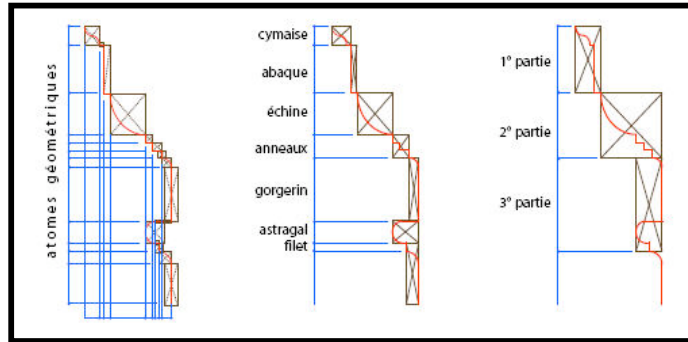


Figure 23.Description sémantique d'un chapiteau dorique à partir du traité de Palladio

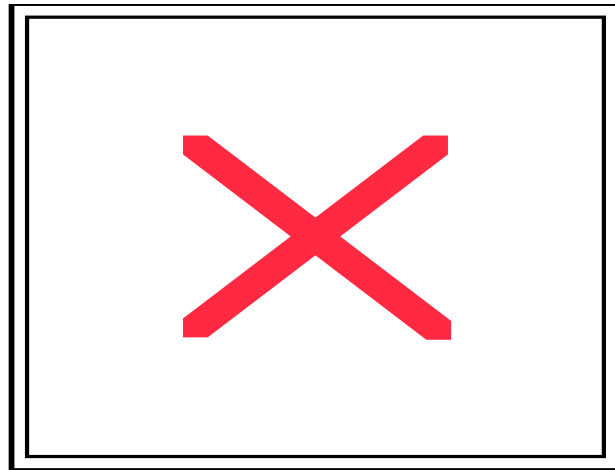


Figure 22.Description géométrique d'un chapiteau dorique à partir du traité de Palladio.

Ainsi il attribue des terminologies architecturales à des ensembles d'atomes, pour constituer une hiérarchie dans la construction du profil générateur.

Enfin il instancie ces primitives architecturales au nuage de points, dans le double but de restituer les formes justes et d'extraire des mesures pertinentes

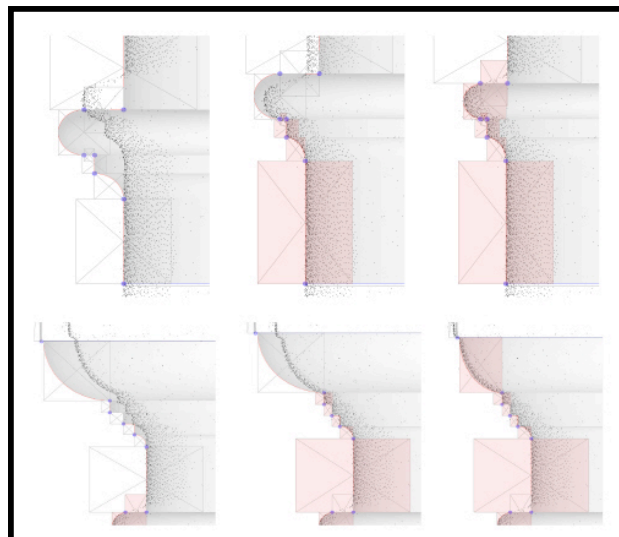


Figure 24.Instanciation de la primitive, déformation sous contraintes des atomes géométriques.

Conclusion :

Nous concluons que cet objet paramétré notamment ces atomes, permet de modéliser un composant géométrique avec seulement quelques points laser, acquis à partir de relevés de profils pertinent, mais aussi de constituer une bibliothèque d'éléments architecturaux par déclaration d'une séquence de moulures, construisant ainsi une représentation géométrique à partir d'une description sémantique.

3. Travail accompli sur la modélisation voûte gothique

Dans cette partie nous allons aborder des exemples de travaux qui ont été fait qui nous on parue intéressant de part leurs approches de modélisation des voûtes

3.1.Exemple 1 : Représentation du modèle 3D de la chapelle Pazzi à Florence

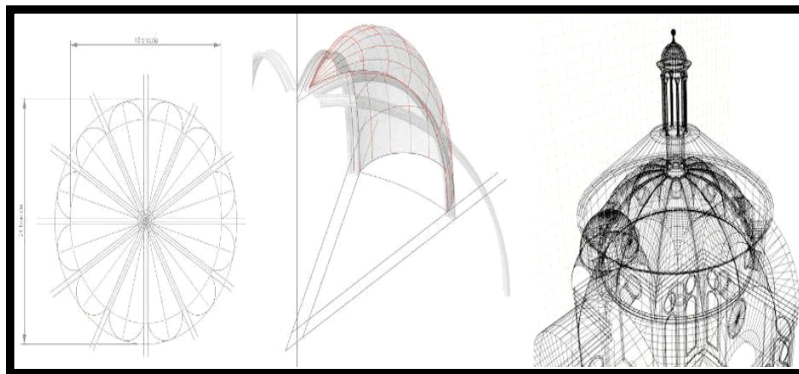


Figure 25. Modèle 3D générer à partir de la Genèse géométrique d'un quartier de la voûte la chapelle Pazzi.

Le modèle a été obtenu grâce au relevé tridimensionnel effectué avec un scanner laser à partir duquel il a été possible de déduire le maillage associé. Ce dernier a été successivement coupé pour comprendre la genèse des surfaces et ensuite, le système constructif. Ici(Figure 25. Modèle 3D générer à partir de la Genèse géométrique d'un quartier de la voûte la chapelle Pazzi. la surface d'un quartier de la voûte est générée par deux portions d'arc à plein cintre qui s'intersectent et sur lesquels glisse radialement un troisième arc qui appartient au plan d'appui. [MEL. 06]

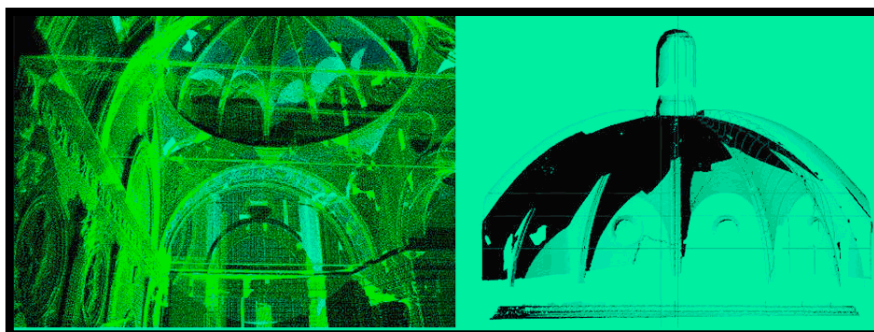


Figure 26.Mesh obtenue du nuage de point 3D de la voûte de la chapelle Pazzi

Conclusion :

La création du maillage de la voûte a été possible a partir d'un modèle géométrique déduit du relevé, il s'est basé sur une succession de coupes, afin de déduire les profils en l'occurrence ici des intersections d'arc plain cintre de la voûte et le comparant au tracé géométrique bien établie au niveau du plan,

3.2.Exemple 2 : Restitution d'un modèle d'architecture gothique à partir du plan

Dans cette exemple le paramétrage de la voûte se fait à partir du plan, en retraçant les traits et leurs intersections comme éléments de la voûte, puis on les soumet à un module d'analyse du dessin, qui les identifie à partir d'une base de connaissances de l'architecture gothique.

-Une fois la classification effectuée, le système dispose d'un modèle paramétré décrivant la partie de l'édifice concerné. Ce modèle est constitué des objets représentant les éléments de l'édifice et des relations qu'ils entretiennent. Il peut être affiné par l'architecte notamment en

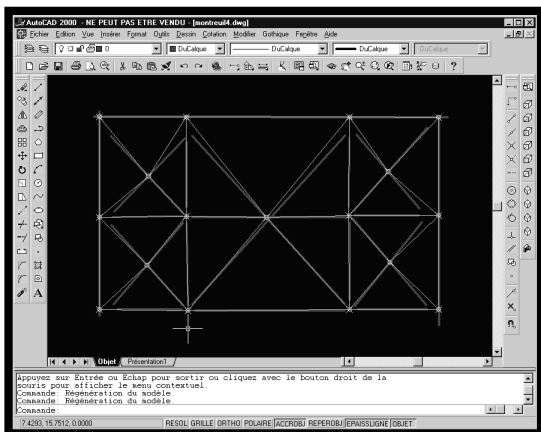


Figure 27. Repérage des éléments à travers le planLe graphe topologique

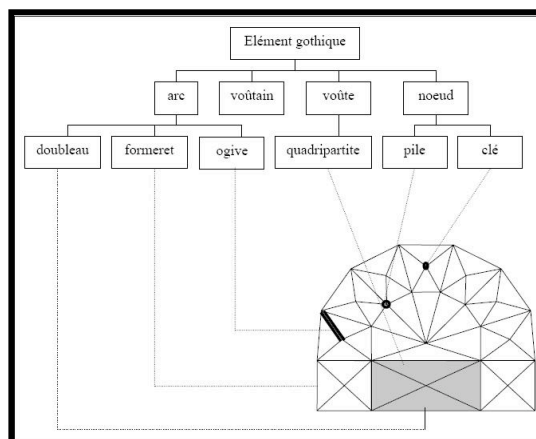


Figure 28. Rattachement des éléments du graphe topologique aux classes de la base de connaissances sur l'architecture gothique.

ce qui concerne les données non transmises par le plan. Afin de mailler le modèle 3d de la voûte pour un calcul structural permettant de simuler les charges de la surface de la voûte. . [GEN.02]

Conclusion :

Le processus de paramétrage est basé sur la classification des éléments, dans un organigramme hiérarchique et relationnel. La modélisation se fait à partir d'une identification au niveau du plan,

en identifiant seulement les éléments de la voûte tels que ogives, doubleaux, formerets, Mais négligeant des éléments comme les liernes et les tiercerons qui permettent de mieux déduire la forme de la voûte. L'ogive diaphragme (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), et les trompes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), modifiant également la forme de la voûte. Ces éléments peuvent être localisés à l'aide de relevé laser, ou photogrammétrique.

Chapitre III : CORPS DU TEXTE

Introduction :

Dans ce chapitre nous abordons en premier une étude sur la voûte gothique en d'identifiant :

Ces éléments, et ces typologies

En second on propose des paramètres pour concevoir notre objet paramètres qui servira de modèle géométrique dans l'optique d'une application aux outils de relevés notamment le relevé laser.

Ainsi nous proposons un outil de modélisation de voûte basé sur une connaissance architecturale notamment le style gothique.

I- Etude de la voûte gothique :

1. Définition :

-**Voûte** : Construction en maçonnerie disposée en arc et formant le plafond d'une construction⁹

l'élément primordial de l'architecture gothique, est la croisée d'ogives, c'est celui sur lequel repose tout son système constructif.

La voûte sur croisée d'ogives est une voûte de blocage (ou d'appareil) composée généralement de quatre compartiments pourtant sur deux nervures en diagonale qui se coupent à la clef, et encadrée par deux arcs doubleaux lancés au long des murs goutteraux. Chacune des nervures en diagonales s'appelle ogive ou arc ogif, leur réunion est la croisée d'ogives.

La voûte d'ogives peut être simple, sexpartite, à liernes, à liernes et tiercerons, en étoile

Dans une telle voûte, les lits de pierres de chaque compartiment sont parallèles à la ligne de faîte, et tout le poids de la voûte retombe sur les quatre angles ou se localisent les poutres [AUB.43].

Afin de pouvoir paramétrer notre voûte il fallait en définir ses variantes pour cela, nos critères de sélections se sont basés sur deux niveaux

Al' échelle de la voûte

Identifie ses composantes :

- Les éléments principaux : ogives diagonales, formerets, et les doubleaux.
- Les éléments secondaires : liernes, et tiercerons.
- Clef, ogives diaphragme, trompe.
- leurs compositions à travers notamment leurs tracés régulateurs

Al' échelle du plan

On classe la voûte selon :

- la forme géométrique sur le plan (carré, rectangleetc)
- L'emplacement dans l'édifice (nerf, collatéraux.....etc)

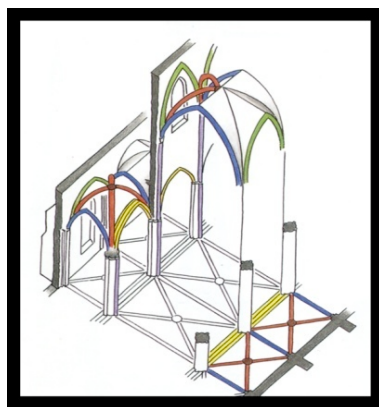


Figure 29. Voûtes de nef et de collatéral

2. étude à l'échelle de la voûte gothique

Nous avons identifiées les composantes de la voûte (voir Figure 300). Ils constituent les paramètres de combinaison pour la construire.

⁹ medieval.lacorreze.com

Dans cette phase nous prenons en considération les variations et l'évolution dans le temps et les lieux apportée à la voûte gothique et étudier les différents cas

- I. Eléments principaux
 - a) 1-ogives diagonales (c)
 - b) 2-formeret (f)
 - c) 3-doubleau (g)
- II. Clefs
 - a) Clef principal
 - b) Clef de Tierceron
- III. Eléments secondaires
 - a) Liernes (e)
 - b) Tirerons (d)
 - c) Nervure secondaire

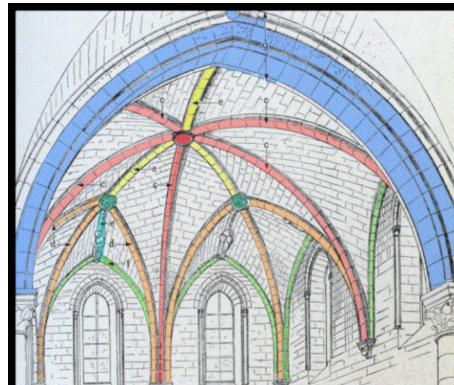


Figure 30. Voûte à nervures multiples

2.1. Les éléments principaux

Ce sont les éléments fondateurs d'une voûte qui définissent sa forme, et qui supportent la charge des voûtains.

2.1.1. Ogive

Une **ogive** est un terme d'architecture qui désigne un arc brisé formé par une voûte. L'ogive désigne la forme des voûtes, et des arcades dont le contour est déterminé par deux portions d'arcs égaux se coupant à angle curviligne aigu et s'arrêtant en général sur la ligne du centre. Andrea Palladio (It., 1508-80) distingue le plein cintre et l'ogive.

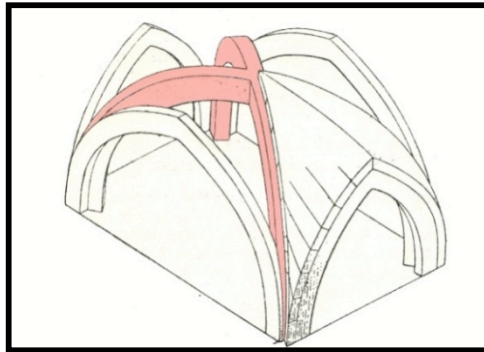


Figure 31. Ogives de voûte

2.1.2. Arc doubleau

Un arc-doubleau est un arc perpendiculaire à l'axe de la voûte et appuyés contre la face intérieure des murs (il double la voûte). C'est arc reliant les murs aux piliers encadrant la nef sont des arcs-doubleaux. Ils délimitent les travées. Perpendiculairement aux murs gouttereaux, il est placé en doublure sous la voûte. Il a un rôle de renfort et sépare la voûte en différentes travées.

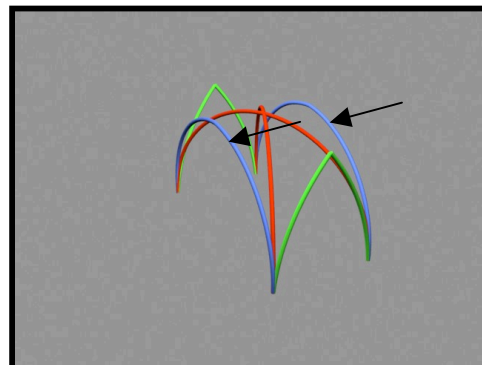
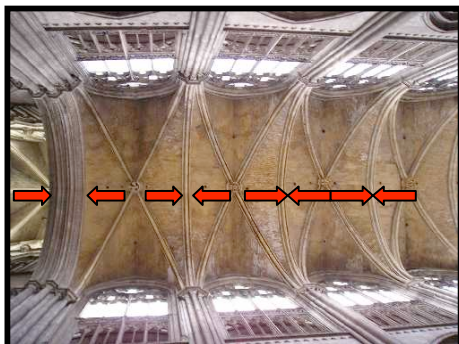


Figure 33. Doubleaux de la Nef de LA CATHEDRALE DE ROUEN

2.1.3.formeret

L'arc formeret est un arc situé à l'intersection entre le mur porteur (d'un collatéral par exemple) et une voûte, c'est arc recevant une voûte d'arête le long d'un mur. Les arcs formerets sont des nervures parallèles d'une voûte gothique, elles sont placées parallèlement à l'axe de la nef d'une cathédrale.



Figure 35. Formeret du Réfectoire de Noirlac.

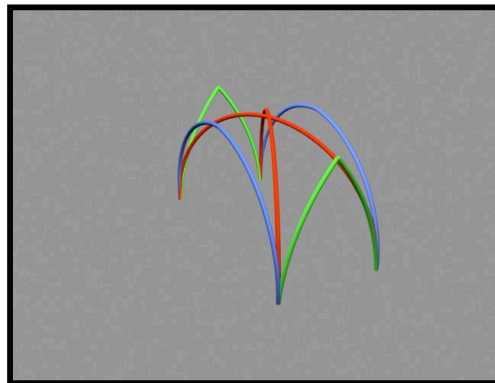


Figure 34. schéma 3D des formerets.

2.2.

Les éléments secondaires

2.2.1.La lierne

La lierne est une nervure d'une voûte ogivale gothique : partie réunissant les sommets des doubleaux, des formerets, ou tiercerons à la clef de voûte.

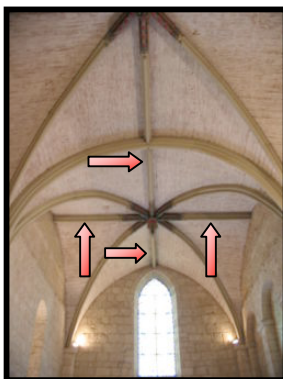


Figure 36.Liernes d'une voûte gothique

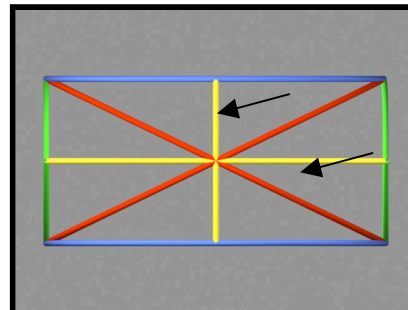
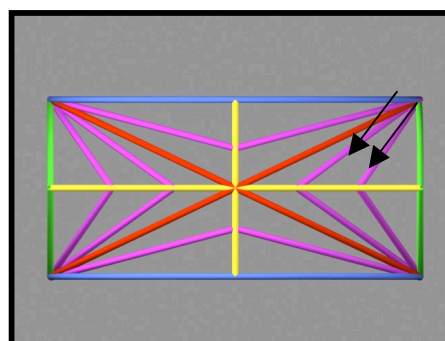
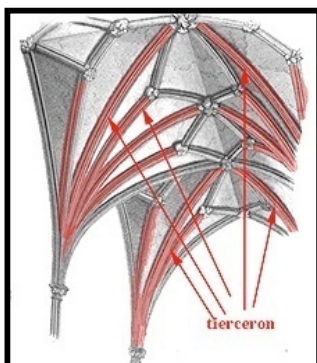


Figure 37. schéma en plan des liernes.

2.2.2.Le tierceron

Le tierceron est nervure dans une voûte qui ne rejoint pas la clef de voûte principale, mais pour s'arrêter à une clef de voûte secondaire. il peut aussi rejoindre à son extrémité une lierne en la divisant au milieu ou son tiers aux angles d'une voûte de style Gothique



2.2.3. Les nervures secondaires

Ce sont des nervures supplémentaires qui viennent se combiner avec les liernes et les tiercerons pour les relier à des clefs secondaires de tiercerons ou nervures en couronnes.

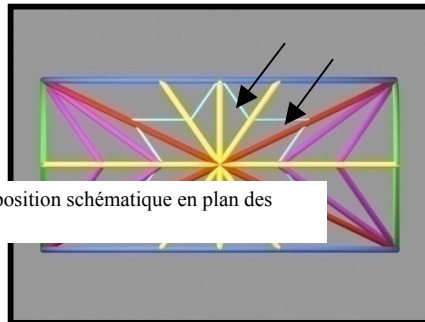


Figure 38. Proposition schématique en plan des tiercerons.

Figure 39. Tiercerons

Figure 40. Nervures secondaires sur une vue en plan

2.3. Les profils des arcs

L'art roman n'admettait pour les doubleaux qu'une section rectangulaire ou une forme en boudin : il sculptait les nervures mais les profilait à peine. Les nervures profilées appartiennent à l'architecture gothique. En général pour tous les tracés de moulures, les architectes s'attachent à des formes inscriptibles dans un épannelage très simple. L'épannelage se sent sous le détail et donne un effet de masse franc et net.

2.3.1. Profils à épannelage rectangulaire :

Les plus anciennes nervures (A et B) (Figure 41), s'inscrivent dans l'épannelage rectangulaire des arcs doubleaux romans.

Pour passer de l'arc doubleau à profil rectangulaire non taillé à l'arc doubleau A, il suffit de dégager le long de chaque arête saillante un boudin (n) que des refouillements en cavet permettent de prendre dans la masse. Le profil de la nervure diagonale B est un simple boudin également pris dans la masse rectangulaire d'épannelage.

Tels sont les profils des chapelles de saint-Denis, construites par Suger vers 1130.

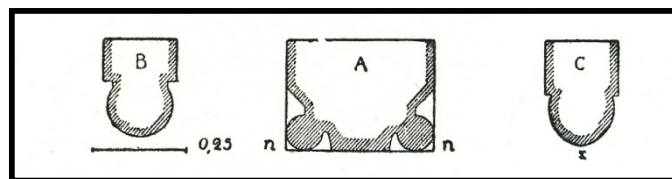


Figure 41. Profils à épannelage rectangulaire

Pour le chœur ils avaient adopté le profil B, au porche ils introduisent la variante C, où la courbe se brise et donne une arête x qui accroche la lumière (Figure 41)

2.3.2. Profils à épannelage triangulaire :

Dès qu'intervient l'idée de construire les premières assises en tas de charge. A ce moment le profil se transforme. On resserre la surface d'emprise des nervures en établissant entre elles des pénétrations profondes.

S'il faut pour obtenir les pénétrations se résoudre à entamer la nervure, on essaye que l'altération ne porte que sur des membres accessoires, et qu'une moulure dominante marquant l'arête descende sans interruption jusqu'aux naissances.

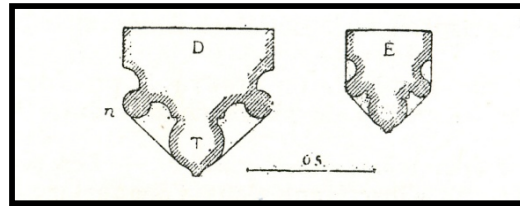


Figure 42. Profils à épannelage triangulaire

Un profil à épannelage triangulaire permet seul de satisfaire à cette condition : de la, à partir du XIII^e siècle, la tendance à remplacer l'épannelage rectangulaire, qui pourtant était meilleur au point de vue de la résistance, par un épannelage triangulaire qui se prête mieux aux pénétrations :

Des formes de la (Figure 41. Profils à épannelage rectangulaire) on est conduit à celles de la (Figure 43) La silhouette générale est un trèfle : trois tores principaux séparés par des cavets. Les plus anciens tores sont simplement à section circulaire .

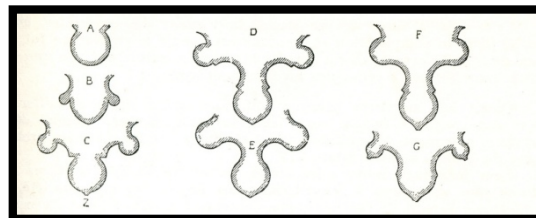


Figure 43. Développement du tore

On arrive au moins pour le tore arêtier, à redessiner l'arête non seulement par cette brisure que nous avons aperçue à Saint-Denis, mais par une contre courbe telle que z (Figure 43) ; le tore devient alors un boudin « nervé ». Cette modification se produit vers le premier quart du XIII^e siècle.

Au cours du XIII^e siècle, les tores tendent à s'enlever en lignes de plus en plus accentuées, plus fines et plus brillantes ; et pour les mettre plus en valeur, les cavets séparatifs s'agrandissent sans cesse, formant entre les lignes lumineuses comme des champs de repos de plus en plus larges.

Le détail A (fig.43), rappelle l'aspect primitif du tore : son seul accompagnement consiste dans les listels qui le dégagent .

Pour mieux le détacher, on le borde de deux baguettes avec sans listels (détails b c) (fig.43), Ces baguettes, d'abord adhérentes au tore, peu à peu s'en séparent, ce qui ajoute à la netteté de l'effet : le tore avec ces molures accessoires se présente, vers le milieu du XIII^e siècle, sous un aspect général tel que D E F

Jusqu'ici on n'avait nervé encore que le tore arêtier

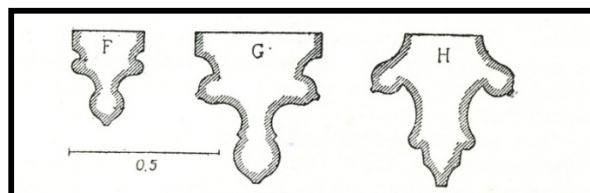


Figure 44. Développement du tore et de la baguette

Bientôt on nerve tous les tores ; on nerve même les baguettes qui bordent.

Enfin on nerve les tores non plus seulement sur leur arête mais sur leurs côtés, ce qui conduit au profil G.

Ainsi se succèdent et s'enchaînent les transformations progressives du membre élémentaire de la nervure. Ainsi prennent naissance (fig.43) les profils d'ensemble en apparence étranges des derniers temps de l'art gothique .

Les types de F et G appartiennent au XIV^e siècle, le type H aux XV^e et XVI^e. [GROD.76]

2.3.3.Profils avec ornements :

À partir du XIII^e siècle jusqu'au XVI^e, les arcs-doubleaux, les arcs-ogives et les formerets ne sont plus ornés que par des moulures, sauf quelques très-rares exceptions; ainsi dans les chapelles du chœur de Saint-Étienne de Caen, qui datent du commencement du XIII^e siècle, les arcs-ogives sont décorés par **une dentelure** (A)(fig.45), mais il faut dire qu'en Normandie ces sortes d'ornements, sont des restes de l'architecture romane, soit par suite d'un goût particulier, soit à cause de la facilité avec laquelle se taille la pierre de Caen, le roman empiètent sur l'architecture ogivale jusque vers le milieu du XIII^e siècle. Pendant le XII^e siècle, en Bourgogne, dans l'Île-de-France, on voit encore les arcs-doubleaux et les arcs-ogives ornés de **dents de**

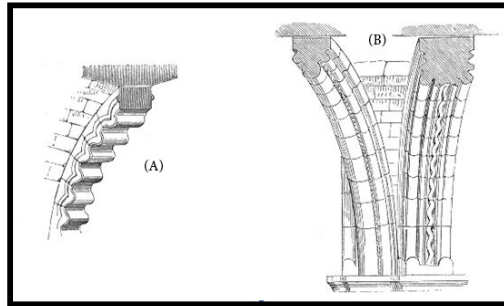


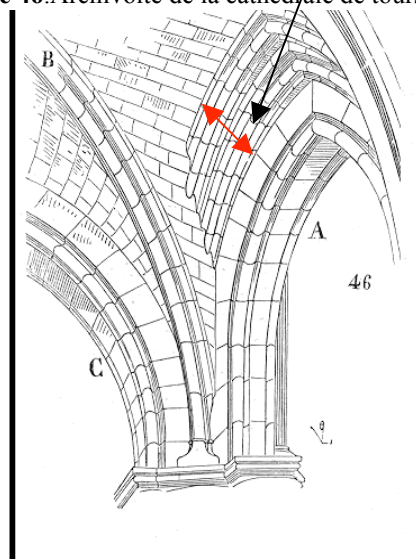
Figure 45.Ornements d'arcs.

scie, de pointes de diamant, de bâtons rompus (B) (fig.45); salle capitulaire de l'église de Vézelay, porche de l'église de Saint-Denis, etc. Les arcs-ogives du chœur de l'église de Saint-Germer sont couverts de riches ornements.

2.3.4.L'archivolte

L'archivolte A, aussi épaisse que les piles, est surhaussée afin de pouvoir pénétrer les voûtes au-dessus de la naissance des arcs-ogives A(fig.46) , et ses derniers rangs de claveaux reportent le poids des murs sur le sommier de l'arc-doubleau C; ainsi, l'arc-ogive et la voûte elle-même sont indépendants de la grosse construction, qui peut tasser sans déchirer ou écraser la construction plus légère de ces voûtes et arcs-ogives. [GROD.76]

Figure 46.Archivolte de la cathédrale de tours.



2.4.Les clefs

Ce mot, appliqué aux ouvrages de maçonnerie, signifie le claveau qui ferme un arc(fig.47), celui qui est posé sur la ligne verticale élevée du centre de cet arc [EUG.78].

2.4.1.Clef principale :

C'est la clef la plus importante dans une voûte car elle se trouve à l'intersection des ogives diagonales, au sommet du claveau d'arc doubleau. C'est l'objet qui a eu toute l'attention des concepteurs gothique .En lui ils ont exprimé toutes leurs métrises et ingéniosités d'un simple claveau à un objet sculpté, à une clef en couronne, mais aussi en clef pendante, Enfin ils l'ont même parfois remplacé par une pile.

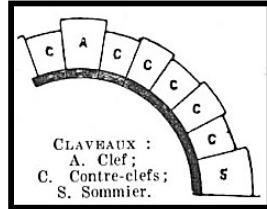


Figure 47.Section d'un claveau.

a) La clef sculptée

La clef sculptée la plus ancienne que nous connaissons se situe dans la tribune du porche de Vézelay. Toutes les voûtes de ce porche, sauf deux, sont encore dépourvues d'arêtiers. L'une de ces deux voûtes, dont la construction remonte à 1130 environ, présente, à l'intersection des deux arcs, une belle clef richement sculptée. Non seulement la clef a un aspect esthétique, religieux mais elle était aussi fonctionnelle car au centre de certaines clef, on trouve des percées pour laisser passer un fil pour suspendre un lustre



Figure 49.Clef de la cathédrale de Laon.

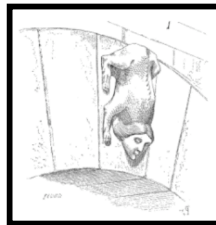


Figure 50.Clef archivolte du Puy en Velay.



Figure 48.Clef de voûte de l'église abbatiale de Vézelay.

b) Clef pendante¹⁰

C'est une clef de voûte, généralement ouvragée prolongée en saillie sous l'intrados et en prolongeant un objet dit : pendentif

¹⁰ www.ggl.ulaval.ca



Figure 51. Clef de voûte de l'eglise abbatialecd' Eu.



Figure 54. Clef de voûte du XV^e tête de poinçon.

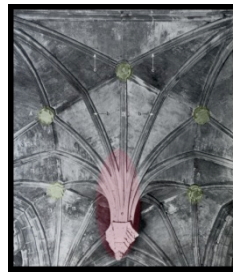


Figure 53. Clef de voûte sans nervure en couronne.



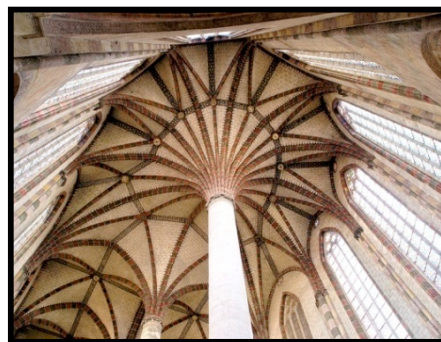
Figure 52. Clef de voûte avec nervure en couronne.

c) Clef en couronne

On l'a identifiée comme une nervure de forme circulaire qui a pour centre le point d'intersection des ogives diagonaux. On la repère dans des coupôles, ou des voûtes qui se trouvent sous des clochers. Dans certains exemples la partie de voûtain à l'intérieur de cette nervure en couronne est vide.

d) Pile

On a trouvé dans notre recherche sur les variations et typologies de clefs principales des voûtes, le cas où la clef est remplacée par une pile. L'église dominicaine à Toulouse étant l'exemple le plus connu.



2.4.2. Clef secondaire

a) Clef de lierne

C'est une clef qui se situe à l'intersection de l'extrémité supérieure d'un tierceron avec une lierne (Rappelons qu'une lierne se situe entre la clef principale et le sommet du formeret ou doubleau). Le nombre de clefs de liernes augmente, si on augmente le nombre de tierceron, avec une distance égale entre chaque clef.

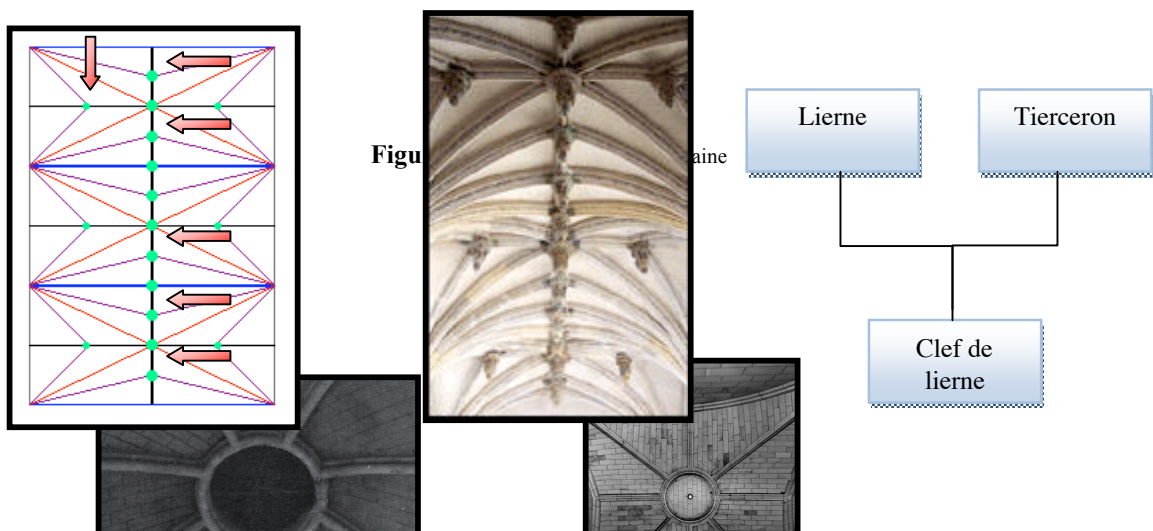


Figure 60.Voûte avec huit clefs de tiercerons.

Figure 58.Eglise de Poix de Picardie

Figure 59.Schéma des éléments en relation avec une clef de lierne

b) Clef de tierceron
c'est une clef qui se situe à l'intersection d'un tiercerons, avec une nervure secondaire, et d'une liernes.

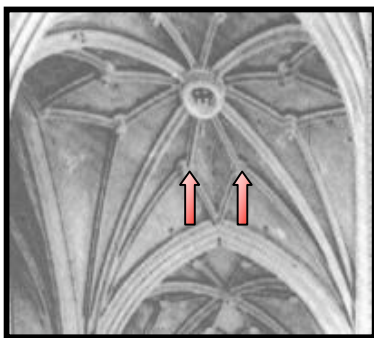


Figure 62.vue en plan de clefs de liernes.

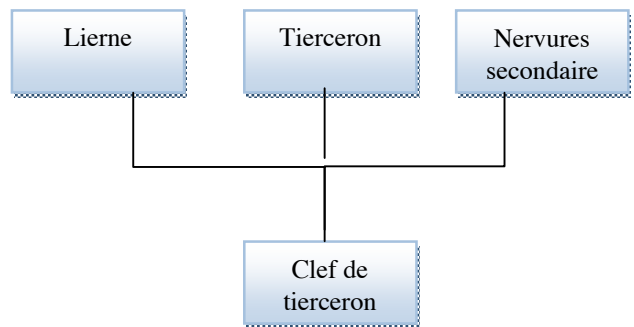
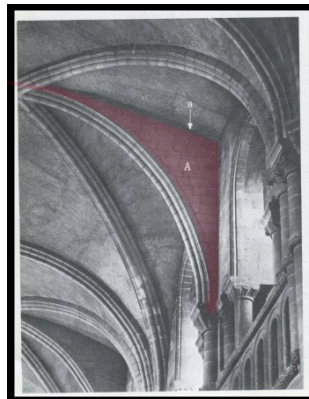


Figure 61.Schéma des éléments en relation avec une clef de lierne

2.5. L'ogives diaphragme

Semblable à l'arc doubleau, il comprend dans sa partie supérieure un pan de mur transversal destiné à le soutenir, appelé **diaphragme**, dont les deux faces sont dégagées (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). L'ogive diaphragme se trouve en général sur une lierne ou une ogive d'une voûte absidale.



2.6. Les trompes

Figure 63. Ogive diaphragme

Elément en forme arquée placée dans les angles d'une construction pour passer du carré à l'octogone : ce passage se fait grâce au petit mur que supporte la trompe. Utilisée notamment pour l'édification des coupes .

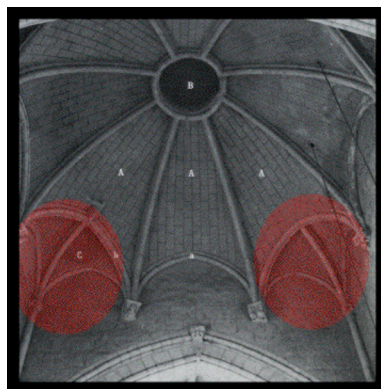


Figure 64. Les trompes d'une voûte d'ogive à huit quartiers

3. ETUDE DU PLAN

Pour cela on a procédé comme suit :

3.1. Classification selon la forme

Nous avons classé les différentes voûtes par rapport à leurs projections horizontales, qui nous a permis de définir des variantes du plan carré, circulaire, rectangulaire et plan quelconque.

3.2. Classification selon l'emplacement

Nous avons pu constater que la voûte gothique varie, selon son emplacement sur le plan, par ailleurs on remarque que le niveau de complexité d'une voûte sur plan rectangulaire se complexifie d'une nef centrale aux nefs collatérales.

Vert : transept

Ocre : chevet ou abside

Rouge : nef principale

Bleu : nefs latérales ou collatérales

Marron : croisée des transepts

Noir: travée

1 : choeur

2 : déambulatoire à chapelles rayonnantes

3 : croisillon

4 : absidiole

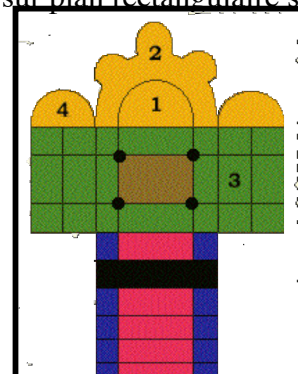


Figure 65. Schéma général d'un plan gothique.

4. Organigramme typologique :

A partir de cette analyse on a pu hiérarchiser et identifier la voûte d'ogive selon un organigramme typologique qui identifie ses variations et complexités.

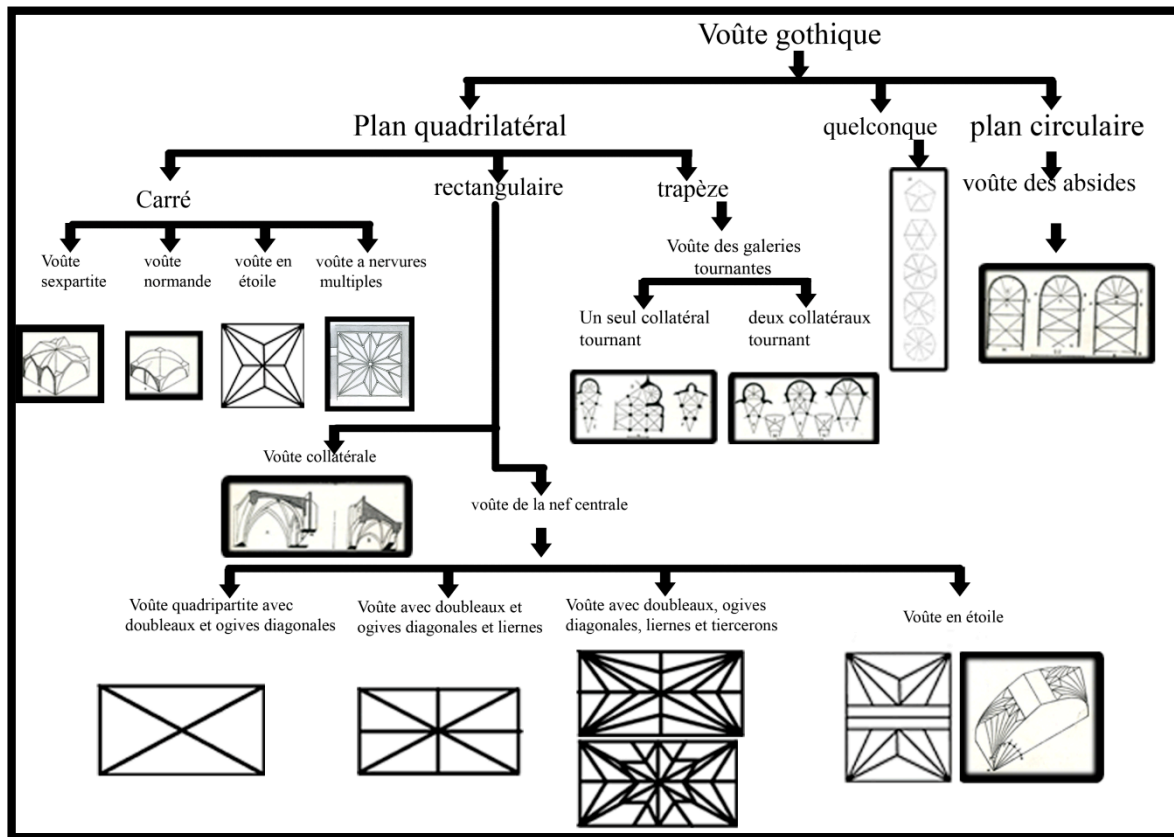


Figure 66. Organigramme typologique proposé.

Remarque : Pour des raisons temps nous avons décidé de concentrer notre travail que sur la voûte sur plan barlongue (rectangulaire) utilisée en France nous étudierons :

- La Voûte quadripartite avec doubleaux et ogives diagonales.
- La Voûte avec doubleaux et ogives diagonales et liernes.
- La Voûte avec doubleaux, ogives diagonales et tiercerons.

Pour pouvoir la paramétré et valider notre méthode.

II. Paramétrage de la voûte sur plan rectangulaire

1 .Les éléments principaux (Paramétrage du tracé des arcs)

Le tracé des ogives diagonales, formerets, et doubleaux était basé sur des dessins d'arcs les outils de dessin de l'époque dont le compas qui garantit des dessins bien proportionnés et réguliers. Nous avons retenu trois propositions afin de pouvoir paramétrer tout les types d'arcs utilisés dans le style gothique :

1.1. Proposition 1(Projection)

Dans les débuts de l'architecture gothique les premières voûtes sur croisées d'ogive étaient basées sur un tracé hérité du style roman, qui a été utilisé pour les voûte de croisées des transepts, se caractérisent par la projection du tracé de l'ogive diagonal sur les plans contenant les formerets et tiercerons qui donnait comme résultat des arcs brisés projetés de doubleaux et formerets.

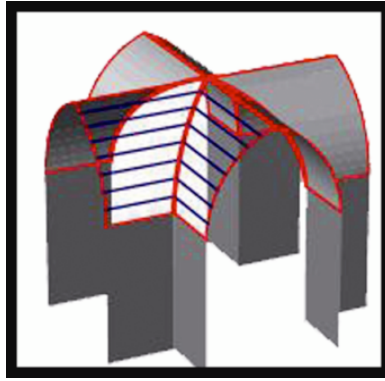


Figure 68. Voûte sur croisées de transepts
(Cas projection).

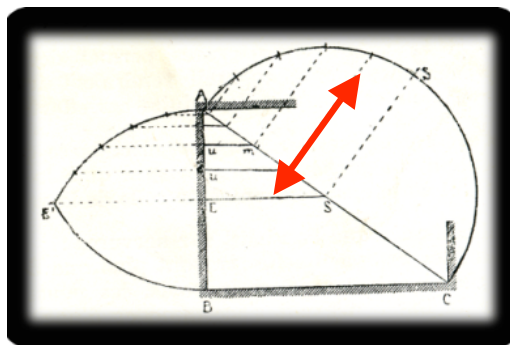


Figure 67.Projection des arcs
(Cas projection).

Cette méthode de projection nous permet de paramétrer la voûte à partir d'un seul élément : l'ogive diagonale plein cintre. Quand les sommets de chaque arc sont au même niveau, ainsi modéliser la voûte avec un seul paramètre notamment le rayon de l'arc (arc plein cintre diagonal Figure 67), puis à l'aide de modeleur on pourra créer notre voûte en projetant qu'à partir de notre ogive diagonal.

Ainsi nous avons besoin du seul paramètre pour modeler la voûte notamment le rayon de l'ogive.

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
rayon : Ogive diagonal	réel	entre 0 et INF	Identification du rayon de l'ogive diagonal permet de déduire les paramètres des arcs formeret et doubleau.

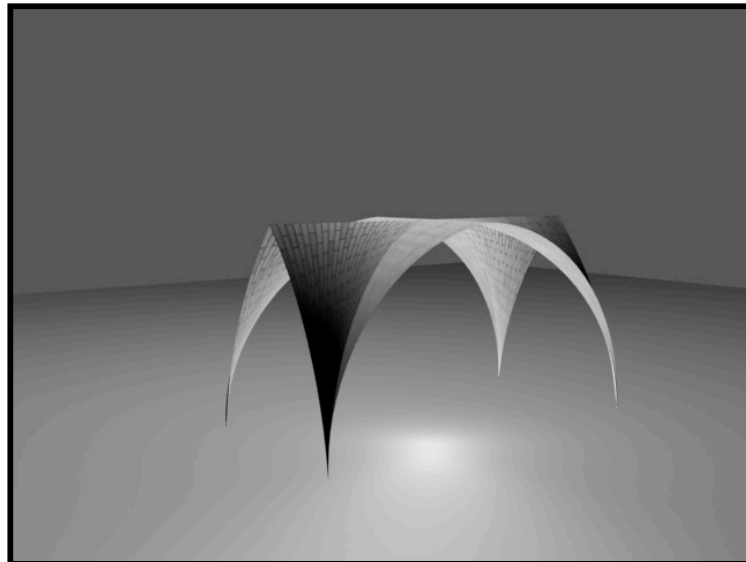


Figure 69. modèle 3D de la voûte cas projection

Remarque :

Cette Méthode ne s'applique pas sur le cas où les formerets ou doubleaux ne sont pas au même niveau, ainsi la propositions 2 et 3 sont des approches qui résolvent ce problème.

1.2.Proposition 2(Cas général) :

C'est une approche déductive purement géométrique elle se base sur un principe simple de repérage du centre des trois arcs (Ogive, Doubleau, Formeret). A l'aide de l'identification du segment de droite qui est perpendiculaire à la droite qui passe par la base au sommet de l'arc, afin de déduire le centre de l'arc qui se situe sur la droite reliant les deux points de base de un des trois arcs. Car dans notre étude tout les centres des arcs utilisés dans le style gothique se situent sur la droite de leurs bases.

Ainsi les paramètres retenus sont :

- la largeur de l'arc
- la hauteur de l'arc

Elle s'applique sur les différents types d'arc même l'arc en lancette¹¹ et on globe ainsi les cas des arcs ogives, doubleau, formeret ou leurs sommets ne sont pas au même niveau.

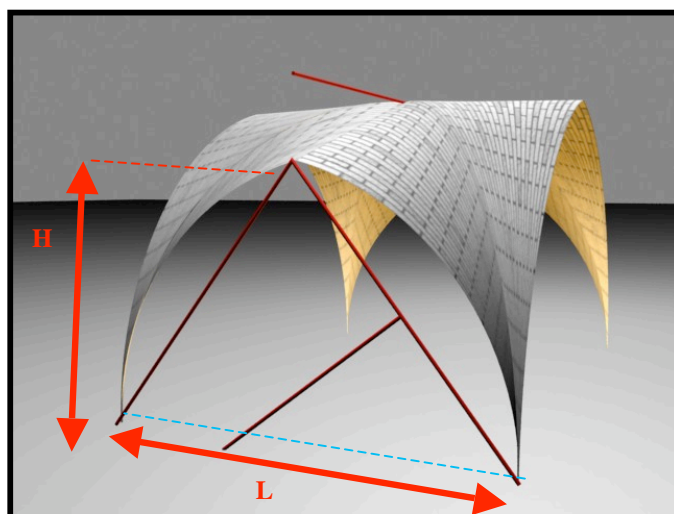


Figure 70.Reperage du centre de l'arc (Cas général)

¹¹ Arc en lancette : arc brisé aigu dont le centre est endors de la base

Ainsi la modélisation de la voûte se fait par le paramétrage de chaque élément des éléments principaux, donc le paramétrage se fait à partir la largeur et hauteur pour chaque arc :

Nom du paramètre		Type	Valeur possible	explication
Ogive diagonal	Hauteur	Réel	entre 0 et INF	Dédution des centres des deux arcs de l'ogive avec sa hauteur et la largeur de la base.
	Largeur	Réel	entre 0 et INF	
doubleau	hauteur	réel	entre 0 et INF	Dédution des centres des deux arcs du doubleau avec sa hauteur et la largeur de la base.
	Largeur	réel	entre 0 et INF	
Formeret	hauteur	réel	entre 0 et INF	Dédution des centres des deux arcs du formeret avec sa hauteur et la largeur de la base.
	Largeur	réel	entre 0 et INF	

Remarque :

Le paramétrage de ces arcs se fait de manière globale il est applicable aux ogives, formerets et doubleaux, qui appartiennent à l'architecture gothique française. Par contre il ne s'applique pas aux voûtes gothiques anglaises, car elles se dessinent avec des arcs à deux centres.

1.3. Proposition 3(Cas Villard) :

Pour cela on a étudié les types de tracés basés sur des règles appartenant au style gothique. On s'est basé sur les travaux de **Viollet-le-Duc**¹² « Dictionnaire Raisoné Architecture Française », et de **Villard de Honnecourt**¹³ ou il répertorie les arcs utilisés dans le style gothique en spécifiant la position des centres des arcs.

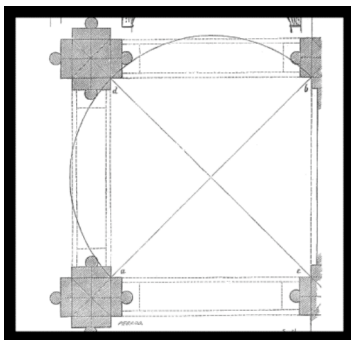


Figure 72. Ogive en plein cintre.

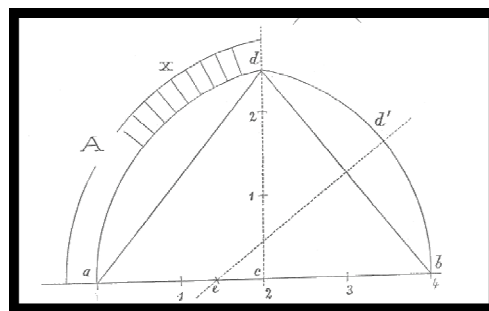


Figure 71. Arc de deux quarts et demi.

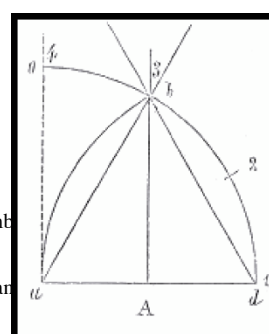
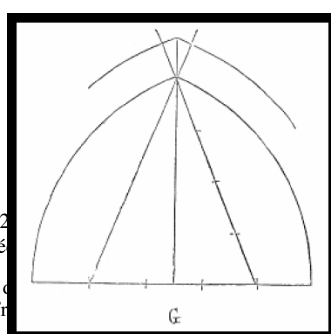
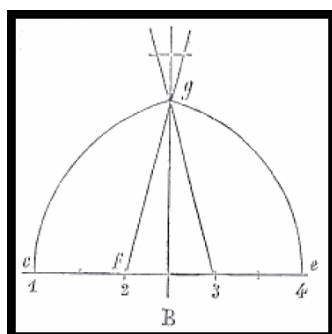


Figure 73. arc brisé engendré par le triangle équilatéral

uc (Paris, 2
ructions mé
re d'œuvre c
onale de Fr
7 septemb
renferman
çais, connu
cture, à

a) L'arc plein cintre

les arcs plein cintre sont formés par un demi-cercle[WIK07]

Hérité des romans (Figure 72), on le trouve surtout dans le style gothique comme ogive diagonale que latérale mais dans certains cas on peut le trouver comme doubleau.

b) L'arc de deux quarts et demi

Ce type d'arc était hérité des Clunisiens¹⁴ (Figure 71) qui l'on importé d'Orient, dérive du triangle donné par Plutarque comme étant le triangle parfait des Égyptiens.

En effet le centre des arcs se trouve à deux quarts et demi de la base de l'arc, et le sommet de

Figure 74. Arc brisé tiers-point.

Figure 75. Arc brisé quinte point.

l'arc se situe aussi à la même distance divisé en deux quarts et demi du milieu de la base.

c) L'arc brisé tiers-point

Ici (Figure 74) le centre de l'arc se trouve au tiers de la base de l'arc.

d) L'arc brisé quinte point

Ici (Figure 75) le centre se trouve au cinquième de la base de l'arc.

e) L'arc brisé engendré par le triangle équilatéral

Ici (Figure 73) le centre de l'arc se trouve à la distance totale de la base qui s'inscrit dans un triangle équilatéral.

f) Le tracé « Villard de Honnecourt »

Villard nous donne une combinaison d'arc pour dessiner une voûte avec une seule ouverture de compas (Figure 79). Dans laquelle il inscrit cette légende: «Par chu fait om trois manières dars, a compas ovrir one fois.» Ce qui veut dire: «Par ce moyen l'on fait trois manières d'arcs avec une seule ouverture de compas.» En effet, soit le rayon AB, nous traçons le demi-cercle (plein-cintre) DBC. Posant la pointe du compas en C, avec le même rayon nous traçons l'arc brisé ACE, inscrivant un triangle équilatéral. Abaisant du point E une perpendiculaire sur la ligne de base, le point de rencontre F divise le rayon AC en deux parties égales. Posant la pointe du compas sur F, toujours avec le même rayon nous tracerons l'arc HCG. Les centres de ce dernier est posés sur les points FA qui divisent la base CG en trois parties égales. C'est cet arc auquel quelques auteurs ont donné le nom de *tiers-point* » [EUG.78]

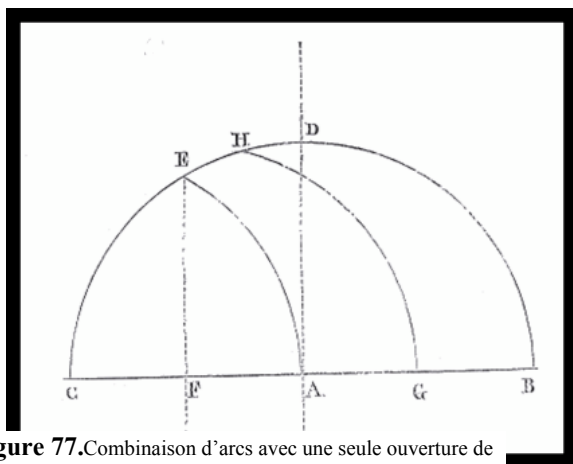


Figure 77. Combinaison d'arcs avec une seule ouverture de compas de Villard

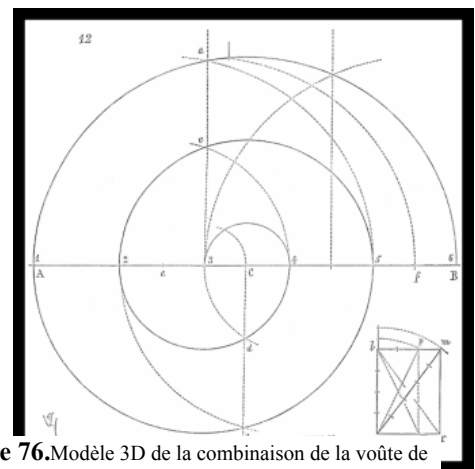


Figure 76. Modèle 3D de la combinaison de la voûte de Villard

¹⁴ L'ordre de Cluny est un ordre bénédictin. Il a été créé par Guillaume I^{er}, duc d'Aquitaine et comte de Mâcon, par un acte rédigé à Bourges le 11 septembre 909

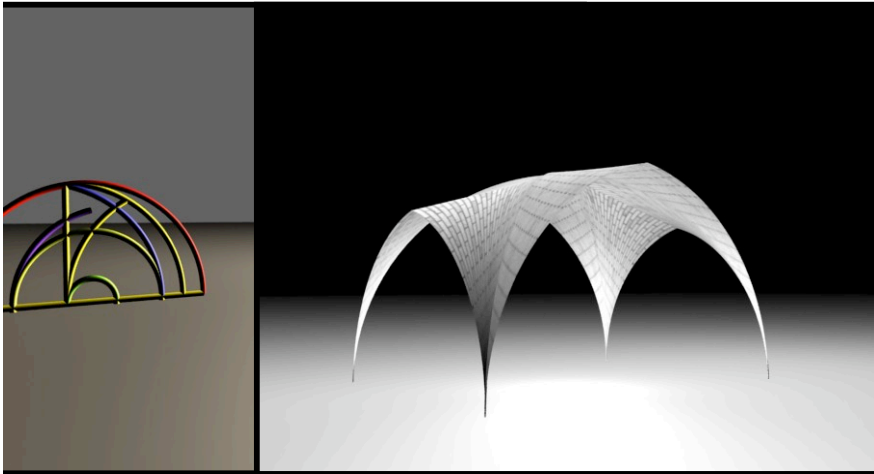


Figure 79. Arcs de voûte gothique avec la combinaison de Villard

Figure 78. Modèle 3d de la voûte (cas villard)

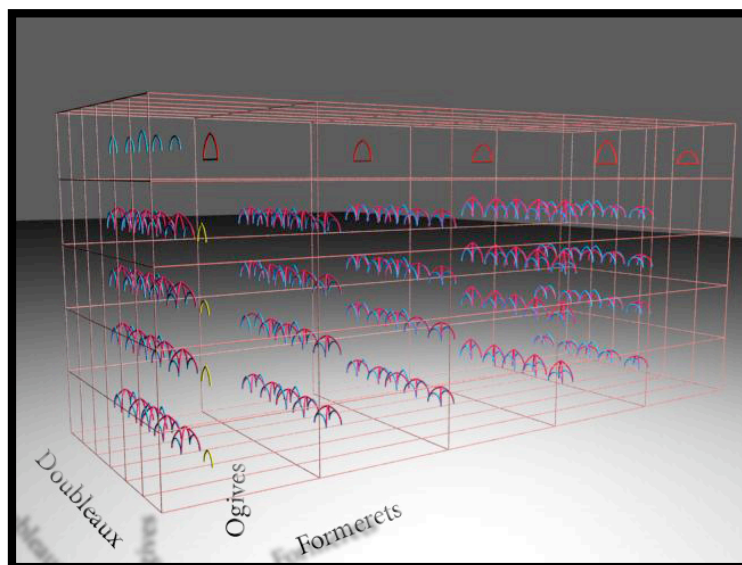


Figure 80. Tableau de la proposition cas spécifié.

-A partir de cette identification des différents type d'arcs nommés ci-dessus on a proposer de dans un tableau a trois repères: ogive diagonale, doubleau, formeret répertoriant des variantes de la voûte gothique à partir de la combinaison de ces cinq types d'arcs.

Cette méthode requiert que l'identification de la distance de la base l'arc ; de ce faite on a qu'un seul paramètre pour chaque arc, réduisant ainsi un paramètre comparé à la proposition (cas général), et à partir du sommet de ces arcs on peut réajuster en variant la hauteur, dans le cas ou le sommet du formeret ou doubleau sont plus haut que de l'ogive.

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
------------------	------	-----------------	-------------

Mémoire Master MSEB Modélisation paramétrique d'une voûte gothique

Type d'ogive Largeur	choix	-arc plain cintre -arc de deux quarts et demi -arc brisé tiers-point -arc brisé quinte point -arc brisé équilatéral	L'utilisateur choisit le type d'arc pour l'ogive.
	réel	entre 0 et INF	Largeur de base de l'arc.
Type de doubleau Largeur	choix	-arc plain cintre -arc de deux quarts et demi -arc brisé tiers-point -arc brisé quinte point -arc brisé équilatéral	L'utilisateur choisit le type d'arc pour le doubleau.
	réel	entre 0 et INF	Largeur de base de l'arc
Type de formeret largeur	choix	-arc plain cintre -arc de deux quarts et demi -arc brisé tiers-point -arc brisé quinte point -arc brisé équilatéral	L'utilisateur choisit le type d'arc pour le formeret.
	réel	entre 0 et INF	Largeur de base de l'arc.

Remarque :

Des cathédrales comme Amiens, chartres, Vézelay présentent des voûtes surélevées, qui appartiennent aux variantes de notre tableau de combinaison notamment Vézelay avec des doubleaux, formeret en arc brisé équilatéral

Et des ogives en arc brisé quinte point.

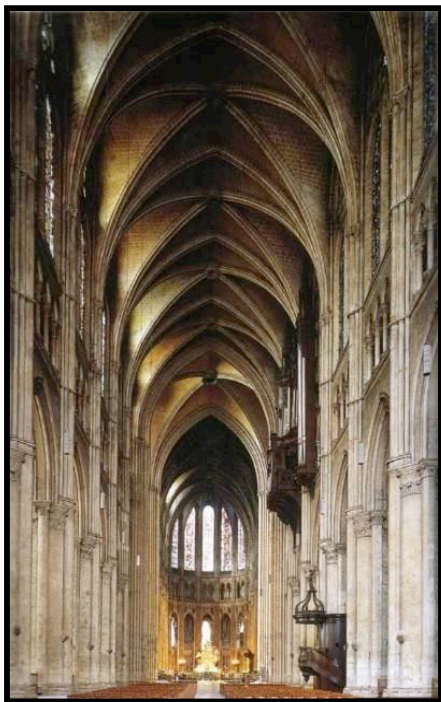


Figure 81. Nef principale de Chartres.

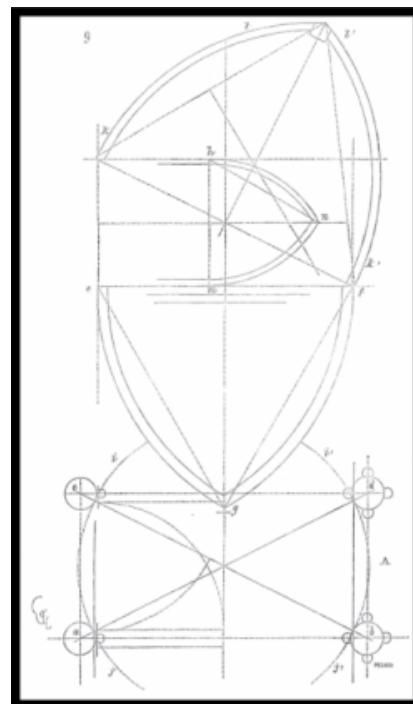


Figure 82. Épure de la voûte haute du porche de Vézelay.

2. Les profils

Lors de notre étude on a constaté que le profil des ogives avait évolué d'un simple profil à épannelage rectangulaire au profil à épannelage triangulaire à travers le développement des moulures notamment des moulures concaves, moulures en tores.

Afin de paramétrer notre sujet nous proposons des sections de profils dans notre outil d'aide à la modélisation en utilisons une bibliothèque qui sera intégrée dans notre modèleur (notamment MAYA-AUTODESK)

Le choix de l'utilisateur se fera comme suit :

-Un langage architectural : cette méthode nécessitera une identification des types de moulures et épannelages (nombre de boudins, cavets, tores, épannelage carré,etc) de sorte qu'on puisse identifier notre profil

-Comparaison : Dans celle-ci l'utilisateur comparera les profils de la bibliothèque avec le profil de l'ogive relevé, après une segmentation d'un nuage de points d'un relevé laser.

-En dernier l'utilisateur choisira l'échelle du profil trouvé

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
profil	choix	épannelage rectangulaire, triangulaire, avec ornements ,archivolte.....	L'utilisateur choisit le type de profil, correspondant au profil du relevé.

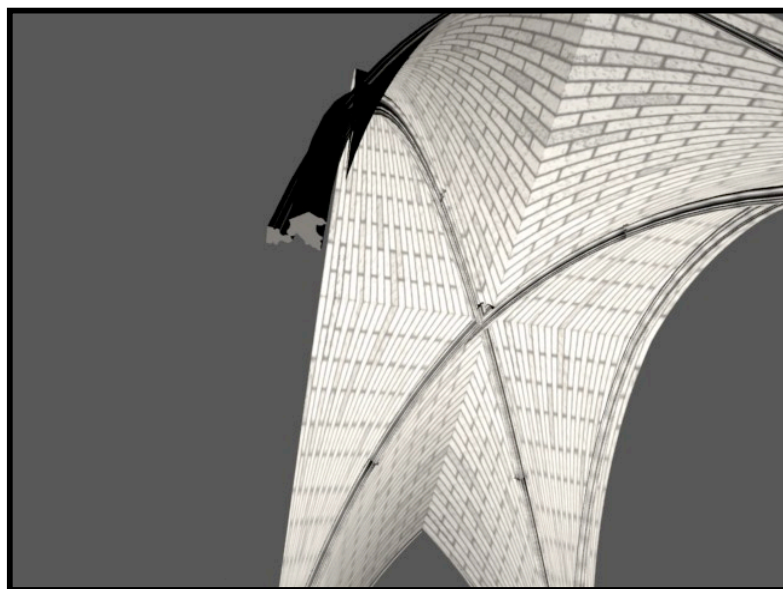


Figure 83. Profils ajoutés a nos tracés des arcs de notre modèle

Proportion profile	réel	entre 0 et 10	Echelle du profile.
--------------------	------	---------------	---------------------

Remarque :

Dans le cas de l'architrave le chemin d'extrusion du profil se fera en intramuros.

3. Les éléments secondaires

Dans notre analyse de la voûte gothique afin de la paramétrer ; on a constaté l'apparition de nouveaux éléments autre que les éléments fondateurs de la voûte(ogive diagonal ,doubleau, tierceron),du gothique primitif au flamboyant, tel que les liernes , tierceron, nervures secondaires, clefs, ogive diaphragme, trompe , ces éléments architectoniques sont à vocation décoratif que structurels , mais leurs identifications et paramétrage est essentiel pour pouvoir identifier notre types de voûte et arriver à niveau de détail assai élevé.

- a- ogive diagonale
- b- Tierceron
- c- Lierne
- d- Nervures secondaires
- e- Nervures en couronne
- f- Clef pendante



Figure 84. Voûte de la croisée des transepts de l'église Saint-Eustache

3.1. Les liernes

On a identifié le tracé des liernes comme un segment de droite ou comme arc, reliant la clef principal au sommet du doubleau, ou formeret

Segment si les deux sommets sont au même niveau dans ce cas les paramètres sont déjà identifiés précédemment

Arc dans ce cas l'utilisateur ajustera l'angle de l'arc.

Mais l'identification des liernes dans les voûtes gothique reste au niveau du plan, donc

Les paramètres qu'on a retenus afin de modéliser nos liernes suivant notre étude analytique de différents types de voûtes existantes sont :

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
lierne	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI si VRAI indique que l'on va créer des liernes.
Nombre Lierne X	réel	VRAI ou FAUX	si VRAI deux liernes relient les sommet des formerets, à la clef principal.
nombre Lierne Z	réel	VRAI ou FAUX	si VRAI deux liernes relient les sommet des doubleaux, à la clef principal.
nombre Lierne XZ	réel	VRAI ou FAUX	si VRAI quatre liernes relient les doubleaux entre leurs tiers au niveau du plan, à la clef principal.
Proportion profile	réel	entre 0 et 10	Echelle du profile.

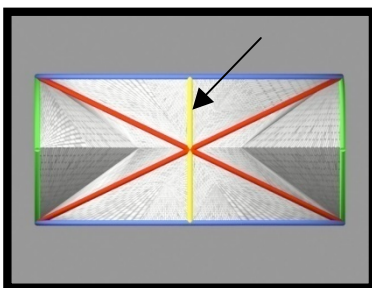


Figure 85. Schéma en plan des liernes en Z.

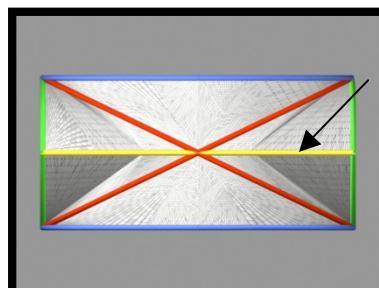


Figure 86. Schéma en plan des liernes en X.

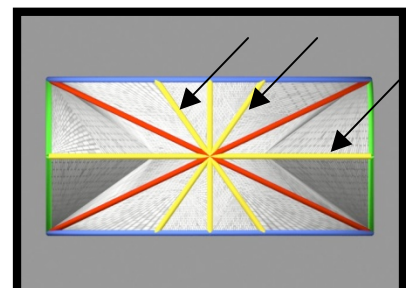


Figure 87. Schéma en plan des liernes en XZ.

3.2. Les tiercerons

La trajectoire des tiercerons sont des arcs qui partent de la bases de la voûte mais le sommet de ces arcs reste variables on peut les situer au niveau du plan car les sommets des ces arcs sont orientés vers : le centre du segment de lierne ou son tiers, dans le cas ou on a des nervu-

res secondaires le tierceron finit sa trajectoire au point d'intersection ,ainsi on trouve souvent dans ces points des clefs secondaires. Tandis que l'angle de cette arc sera ajusté par l'utilisateur par rapport au voutain qui sera déjà formée par les élément principaux.

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
Tierceron	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI si VRAI indique que l'on va créer des tiercerons .
Nb de tierceron sur x	réel	entre 0 et 2	1-modélisation de quatre tierceron qui partent des quatre coins de la voute dont leurs sommet sont la moitié des deux lierne sur x 2- modélisation de huit tierceron qui partent des quatre coins de la voute dont leurs sommet sont tiers et deux tiers des deux lierne sur x
s'il y a des nervures secondaires	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI le sommet du tierceron est le point d'intersection
Nb de tierceron z	réel	VRAI ou FAUX	Si VRAI modélisation de quatre tierceron qui partent des quatre coins de la voute dont leurs sommet sont la moitié des deux lierne sur Z.
s'il y a des nervures secondaires	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI le sommet du tierceron est le point d'intersection.
Proportion profile	réel	entre 0 et 10	Echelle du profile.

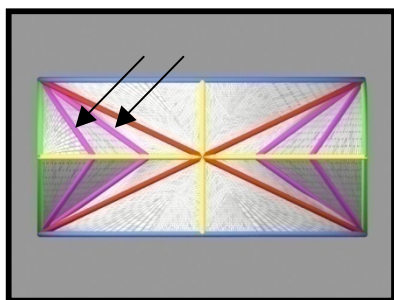


Figure 89.Schéma en plan des tiercerons en Z.

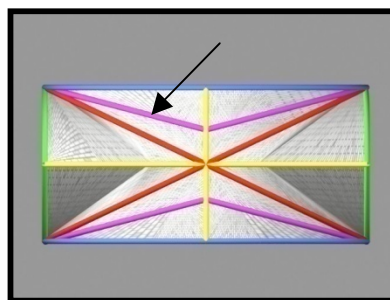


Figure 90.Schéma en plan des liernes en X.

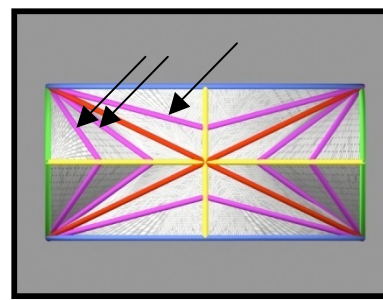


Figure 88.Schéma en plan des liernes en X, Z,XZ.

3.3.Nervures secondaires

Dans notre approche afin de paramétrer ces nervures, on a choisi de les identifier selon leurs positions

Nervures secondaires doubleau.

Nervures secondaire formeret.

Nervures secondaires (2clef).

Les deux premières sont des nervures qui se situent entre le sommet d'arc formeret ou doubleau avec une clef secondaire, la dernière relie deux clefs secondaires.

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
Nervures secondaires	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI si VRAI indique que l'on va créer nervures secondaires.
Nervures secondaires doubleau	booléen	VRAI ou FAUX	Si VRAI modélisation de quatre nervures reliant le sommet des deux doubleaux aux clefs de tiercerons.

Nervures secondaire formeret	booléen	VRAI ou FAUX	Si VRAI modélisation de quatre nervures reliant le sommet des deux formeret aux clefs de tiercerons.
Nervures secondaires (2clefs)	booléen	VRAI ou FAUX	Si VRAI modélisation de nervures reliant des clefs de tierceron à une clef de lierne qui se trouve proche de la clef principale.
Proportion profile	réel	entre 0 et 10	Echelle du profile.

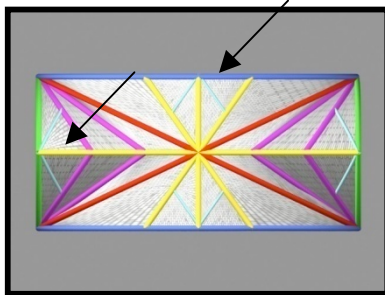


Figure 92. Schéma en plan des nervures secondaire doubleaux et formerets.

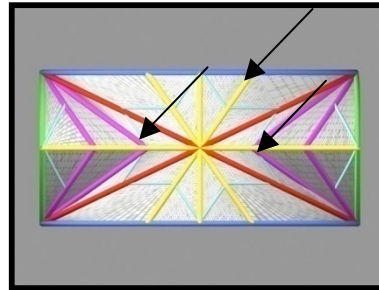


Figure 91. Schéma en plan des nervures secondaire doubleaux, formerets, et des nervures (2Clefs).

3.4. Nervure en couronne

Nous avons choisi de paramétrer cet objet de manière singulière car il nous est apparu comme une nervure qui se distingue des nervures secondaires dans certains ouvrages, comme étant une clef, d'autre part on avait constaté que la nervure est indépendante des tiercerons, par conséquent cela nous enlève un paramètre comparé aux nervures secondaires.

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
Nervure en couronne	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI si VRAI indique que l'on va créer une nervure en couronne.
Diamètre	réel	entre 0 et INF	Rayon de la couronne.
Proportion profile	réel	entre 0 et 10	Echelle du profile.
Vide	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI suppression du voutain qui se situe à l'intérieur de la nervure.

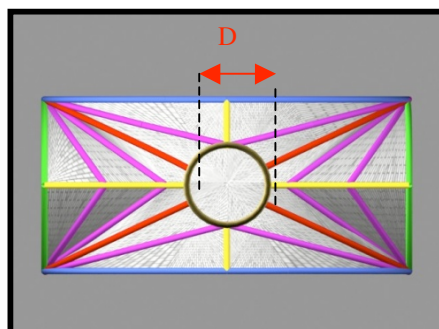


Figure 93. Schéma en plan d'une nervure en couronne

4. les clefs

nous proposons à l'utilisateur l'activation de points d'accroches au niveau des deux types de clefs : central, secondaire. Et de choisir une de leurs variantes.

4.1.Central

L'utilisateur activera automatiquement une bibliothèque de clefs sculptées, ou chargera une clef maillée à partir d'un relevé laser, sinon il devra activer les paramètres d'une clef pendante, ou pile si il veut les modéliser.

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
Intersection centrale	choix	VR FA	va créer une clef
Sculpté	booléen	VR FA	age au point d'intersection des ogives afin lisée
Clef pendantes	booléen	VR FA	va créer une clef pendante
Hauteur	réel	ent INF	pendante
Rayon bas	réel	ent INF	de la clef
rayon haut			ut de la clef
Pile	booléen	VR FA ATTY	va créer une pile
Hauteur	réel	ent INF	pendante au dessus de la pile
Rayon bas	réel	entre 0 et INF	Rayon du profil le plus bas de la partie pendante au dessus de la pile
rayon haut	réel	entre 0 et INF	Rayon du profil le plus haut de la partie pendante au dessus de la pile
Rayon base de pile	réel	entre 0 et INF	Rayon du profil de la base de la pile

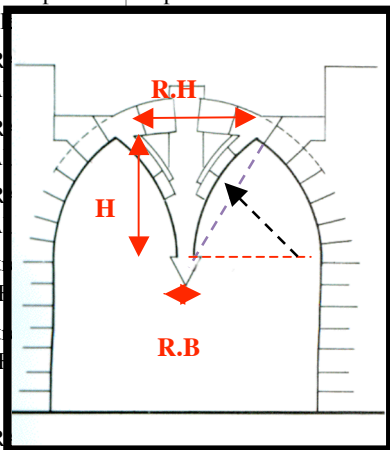


Figure 94. Les paramètres proposés pour le clef pendante

4.2.Clefs secondaires

Nous avons opté pour un accrochage de clefs modelés au préalable que devra choisir l'utilisateur ou chargera, pour cela il doit activé des points d'accrochages, qui se trouve aux points 'intersections des éléments de la voûte voir (fig.95).

Mémoire Master MSEB Modélisation paramétrique d'une voûte gothique

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
Clef lierne x	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation de points d'accrochages à l'intersection des tierceron avec les liernes sur X
Clef lierne z	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation de points d'accrochages à l'intersection des tierceron avec les liernes sur Z
Clef tierceron	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation de points d'accrochages à l'intersection des tierceron avec les nervures secondaires.
Clef doubleau	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation de points d'accrochages aux sommets des doubleaux
Clef formeret	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation de points d'accrochages aux sommets des formerets.
Clef nervures en couronne	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation des paramètres d'accrochages de la nervure
Clef lierne x	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation de deux points d'accrochages aux intersections des liernes sur X avec la nervure
Clef lierne z	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation de deux points d'accrochages aux intersections des liernes sur Z avec la nervure
Clef lierne xz	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI activation de quatre points d'accrochages aux intersections des liernes sur XZ avec la nervure

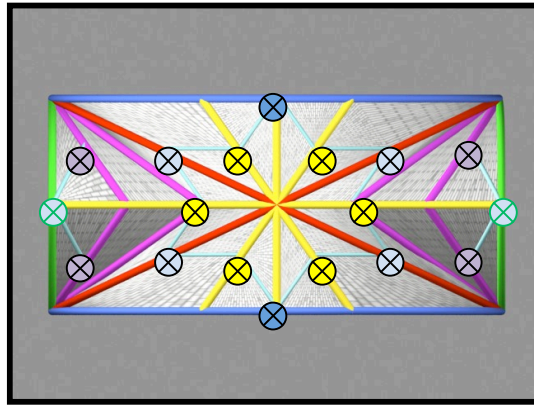


Figure 95. Points d'accrochages des clefs secondaires d'une voûte à nervures secondaires.

5.1'ogive diaphragme

Lors de notre analyse de cette élément on a constaté que les paramètres qu'il fallait identifier sont : la base de cette ogive qui se trouve en général sur une pile , et sa hauteur, sa largeur n'as pas besoin d'être identifier car c'est la même largeur du profil de l'ogive, donc on a choisi les paramètres suivant :

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
Ogive diaphragme	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI, indique que l'on va créer une ogive diaphragme
Hauteur de la pile (HP)	réel	entre 0 et INF	hauteur de la pile (a)
Haut ogive diaphragme	réel	entre 0 et INF	hauteur mur diaphragme

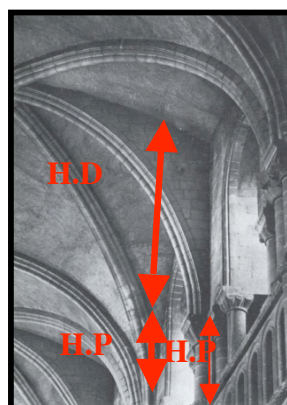


Figure 96. Paramètres de l'ogive diaphragme.

6. La trompe de voûte

Enfin l'utilisateur peut ajouter des trompes à sa voûte modélisée pour cela il doit définir un seul paramètre qui est le diamètre afin de pouvoir ajuster le volume de la voûte .

Nom du paramètre	Type	Valeur possible	explication
Trompe	booléen	VRAI ou FAUX	si VRAI, indique que l'on va créer des trompe



Figure 97. Paramètre de la trompe.

Conclusion

Nous avons procédé à une succession d'étapes méthodologique afin de pouvoir cerner notre objet d'étude notamment la voûte gothique, à travers une étude analytique du sujet qui nous a permis d'identifier des typologies de formes et de compositions tels que :

Les voûte circulaire , en trapèze ,quadrilatéral . qui se situent d'une nef central , collatéral une abside dans un plan gothique.

Mais aussi sur le variations des ses éléments porteurs ou décoratifs tels que les voûte d'ogive simple, à lierne ,à tierceron pour cela on les a identifiés et a classés comme suit :

1-Éléments principaleux :

- les ogives
- les doubleaux
- les formerets

2-Elementes seconds :

- Les Lierne
- Les tierceron :
- Les nervures secondaires
- La nervure en couronne

3-Les clefs

- Clefs principales : sculpté , pendante, ou en pile
- Clefs secondaires : clefs de tiercerons, liernes , de

En raison du temps de durée de notre stage on a dû restreindre notre études à une typologie de voute, et on a choisis la voûte gothique sur croisés d'ogive sur plan rectangulaire dite "barlongue".

L'étape de l'analyse consistait à recueillir une connaissance architecturale afin de l'utiliser dans notre modèle paramétrique ce qui était le cas et on a pue définir des paramètres pour notre voûte à travers :

1-Paramétrage des éléments principaleux

2-Choix du profil

3-Et en fin Paramétrages des éléments seconds

4- accrochage de clefs

5-paramétrage d'ogives diaphragmes ,trombes dans

Conclusion générale

Dans le cadre d'un stage du Master « Modèle désigné globale » ce rapport a abordé un nouveau sujet d'étude notamment l'architecture gothique. S'inscrivant dans l'axe de recherche « Modélisation Paramétrique » au sein du laboratoire Crai à l'école d'architecture de Nancy.

Pour cela on a choisi comme objet d'étude : la voûte gothique sur croisées d'ogive sur plan Barlongue qui symbolise ce style.

Notre travail a consisté à analyser et identifier les paramètres d'un modèle géométrique pour faciliter la modélisation de la voûte gothique à partir d'un relevé notamment laser, à travers des paramètres déduits à partir d'un travail de recherche, et de synthèse de connaissances architecturales théoriques sur ce style.

A partir d'une succession d'étapes, nous pouvons mieux gérer les variations de la voûte gothique sur plan barlongue et de modéliser ainsi un modèle tels que construit.

Les paramètres proposées n'ont besoin que de quelques points, permettant notamment de réduire largement les pertes de données acquises au relevé laser cette méthode peut se transposer dans la modélisation à partir de relevée photogrammétrique mais des éléments comme les clefs restent à modéliser.

Pour conclure, ce travail a permis d'ouvrir un nouveau champ d'application de la modélisation paramétrique dans le style gothique et de prévoir d'enrichir ce travail avec de nouveaux paramétrages tels que :

- Le paramétrage des profils d'ogives
- Le paramétrage des éléments en connexion avec la voûte tels que les piles, corbeaux, fenêtres et arcs boutants

Afin d'avoir un modèle paramétré du style gothique général réunissant tous ses éléments.

Mémoire Master MSEB Modélisation paramétrique d'une voûte gothique

Figure 10.Travée du nerf central de la cathédrale d'Amiens	0
Figure 11.Chapelles de Senlis.....	0
Figure 12.Voûte.....	0
Figure 13.Piles et chapiteaux	0
Figure 14.fenêtres.....	0
Figure 15.Corbeaux.....	0
Figure 16.Profiles bases de piles	0
Figure 17.Profils d'ogives.....	0
Figure 18.Arcs-boutants.....	0
Figure 19.Fonctions de génération des surfaces formalisées	0
Figure 20.Construction d'une moulure par combinaison mécanique d'atomes géométriques	0
Figure 21.Principe de modélisation.....	0
Figure 22.Description géométrique d'un chapiteau dorique à partir du traité de Palladio.....	0
Figure 23.Description sémantique d'un chapiteau dorique à partir du traité de Palladio	0
Figure 24.Instanciation de la primitive, déformation sous contraintes des atomes géométriques.....	0
Figure 25. Modèle 3D générer à partir de la Genèse géométrique d'un quartier de la voûte la chapelle Pazzi.....	0
Figure 26.Mesh obtenue du nuage de point 3D de la voûte de la chapelle Pazzi.....	0
Figure 27.Repérage des éléments à travers le planLe graphe topologique.....	0
Figure 28. Rattachement des éléments du graphe topologique aux classes de la base de connaissances sur l'architecture gothique.	0
Figure 29.Voûtes de nef et de collatéral.....	0
Figure 30.Voûte à nervures multiples	0
Figure 31.Ogives de voûte	0
Figure 32. schéma en 3D des doubleaux.....	0
Figure 33. Doubleaux de la Nerf de	0
Figure 34. schéma 3D des formerets	0
Figure 35. Formeret du Réfectoire	0
Figure 36.Liernes d'une voûte gothique.....	0
Figure 37. schéma en plan des liernes.....	0
Figure 38.Prposition schématique en plan des tiercerons.....	0
Figure 39.Tiercerons	0
Figure 40.Nervures secondaire sur une vue en plan	0
Figure 41.Profils à épannelage rectangulaire	0
Figure 42.Profils à épannelage triangulaire.....	0
Figure 43.Développement du tore	0
Figure 44.Développement du tore et de la baguette	0
Figure 45.Ornements d'arcs.	0
Figure 46.Archivolte de la cathédrale de tours.	0
Figure 47.Section d'un claveau.....	0
Figure 48.Clef de voute de l'église abbatiale de Vézelay.	0
Figure 49.Clef de la cathedrale de Laon.....	0
Figure 50.Clef archivolte du Puy en Velay.....	0
Figure 51.Clef de voute de l' eglise abbatialecd' Eu.....	0
Figure 52.Clef de voûte avec nervure en couronne.	0
Figure 53.Clef de voûte sans nervure en couronne.....	0
Figure 54.Clef de voute du XVe tête de poinçon.....	0
Figure 55.Clef en couronne.	0
Figure 56.Clef en couronne avec vide.....	0
Figure 57.Toulouse église dominicaine.....	0
Figure 58.Eglise de Poix de Picardie.....	0
Figure 59.Schéma des éléments en relation avec une clef de lierne	0
Figure 60.Voûte avec huit clefs de tiercerons.....	0
Figure 61.Schéma des éléments en relation avec une clef de lierne	0
Figure 62.vue en plan de clefs de liernes.	0
Figure 63.Ogive diaphragme	0
Figure 64.Les trompes d'une voûte d'ogive à huit quartiers.....	0
Figure 65.Schéma général d'un plan gothique.....	0
Figure 66.Organigramme typologique proposé.....	0

Figure 67.Projection des arcs.....	0
Figure 68. Voûte sur croisées de transepts.....	0
Figure 69. modele 3D de la voûte cas projection.....	0
Figure 70.Reperage du centre de l'arc (Cas général).....	0
Figure 71.Arc de deux quarts et demi.	0
Figure 72.Ogive en plein cintre.	0
Figure 73.arc brisé engendré par le triangle équilatéral.....	0
Figure 74.Arc brisé tiers-point.....	0
Figure 75.Arc brisé quinte point.....	0
Figure 76.Modèle 3D de la combinaison de la voûte de Villard.....	0
Figure 77.Combinaison d'arcs avec une seule ouverture de compas de Villard	0
Figure 79. Modele 3d de la voûte (cas villard).....	0
Figure 78.ArCs de voûte gothique avec la combinaison de Villard.....	0
Figure 80.Tableau de la proposition cas spécifié.....	0
Figure 81. Nef principale de Chartres.	0
Figure 82. Épure de la voûte haute du porche de Vézelay.	0
Figure 83.Profils ajoutés a nos tracés des arcs de notre modèle	0
Figure 84.Voûte de la croisée des transepts de l'église Saint-Eustache	0
Figure 85. Schéma en plan des liernes en Z.....	0
Figure 86.Schéma en plan des liernes en X.	0
Figure 87.Schéma en plan des liernes en XZ.....	0
Figure 88.Schéma en plan des liernes en X, Z,XZ.	0
Figure 89.Schéma en plan des tiercerons en Z.....	0
Figure 90.Schéma en plan des liernes en X.	0
Figure 91.Schéma en plan des nervures secondaire doubleaux , formerets,et des nervures (2Clefs).....	0
Figure 92.Schéma en plan des nervures secondaire doubleaux et formerets.....	0
Figure 93.Schéma en plan d'une nervure en couronne.....	0
Figure 94. Les paramètres proposés pour le clef pendante.....	0
Figure 95. Points d'accrochages des clefs secondaires d'une voûte à nervures secondaires.....	0
Figure 96.Paramètres de l'ogive diaphragme.....	0
Figure 97.Paramètre de la trompe.....	0

Bibliographie

- [EUG.1978] : Dictionnaire raisonné architecture française XIe au XVIe siècle
Auteur : Eugène Viollet-le-Duc
Edition : Saint-Julien:éd. de Sancey,1978 :
- [CHOISY. 64] : histoire de l'architecture ,tome deux
Auteur : auguste choisy
Edition : Paris : Vincent et Fréal , 1964
- [GROD.76] : architecture gothique
Auteurs : GRODECKI, Louis

Mémoire Master MSEB Modélisation paramétrique d'une voûte gothique

- Edition : Histoire mondiale de l'architecture 1976
-[HOF.68] : Gothique
Auteur : HOFSTATTER, Hans H.
Edition : Architecture universelle 1968
-[AUB.43] : L'architecture française:des origines au XIXe siècle.II: l'époque gothique
Auteurs : Aubert Marcel, Verrier Jean
Edition : Les éditions d'art et d'histoire, 1943 Paris
-[BACH.81] : Racines des cathédrales:l'architecture gothique, expression des conditions du milieu
Auteur : Bachmann, Roland
Edition : Paris:Payot, 1981(Le regard de l'histoire :
-[ROLF.99] : L'Art gothique
Auteur : Rolf toman
Edition : Könemann (4 février 1999)
-[SHÜTZ.02] : **L'art des grandes cathédrales**
Auteur : Bernard Schütz, Albert Hirmer
Edition : Hazan Eds 2002
-[MONT.04] : Architecture : méthode et vocabulaire
Auteur : Pérouse de Montclos, Jean-Marie
Edition : Paris : Ed. du Patrimoine , 2004
-[GDC.07], grand dictionnaire canadien
-[UNI95] : encyclopédie universalise
-[ROB88] : le petit robert

Theses et memoires :

-[LIV06] : thèse sur :**RELEVÉ ET MULTI-REPRÉSENTATIONS DU PATRIMOINE ARCHITECTURAL**
Définition d'une approche hybride de reconstruction 3D d'édifices
Auteur : Livio DE LUCA
Anné : 2006
Lieu :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**

Auteur : **Alain FUCHS**

Anné : 2006

Lieu : laboratoire MAP-CRAI

[ALBY06] : thèse sur :**ÉLABORATION D'UNE METHODOLOGIE DE RELEVÉ D'OBJETS ARCHITECTURAUX**

Contribution basée sur la combinaison de techniques d'acquisition

Auteur :Emmanuel Alby

Anné : 2006

Lieu : laboratoire MAP-CRAI

[BEG03] :mémoire sur :**Contribution à l'élaboration d'un outil d'aide à la modélisation**

Cas d'un entablement composite

Auteur :Begrice Reda

Anné : 2003

Lieu : laboratoire MAP-CRAI

[KAD04] :mémoire sur :**Du modèle architectural au modèle géométrique**

Modélisation de colonnettes khémeres

Auteur :Hayet Khadi

Anné : 2004

Lieu : laboratoire MAP-CRAI

[KAD04] :mémoire sur :**Vers un processus automatique de modélisation du patrimoine architectural au moyen de données laserogamétriques**

Le savoir architectural comme principale source d'information

Modélisation de colonnettes khémeres

Auteur : *Delphine QUESTE*

Anné : 2006

Lieu : laboratoire MAP-CRAI

Articles

1-[Mele. 06] : **Conscience géométrique pour la gestion du projet de construction, analyse et interprétation du modèle 3D**,Mele G.Università degli Studi di Firenze, Facoltà d'Architettura

Dipartimento di Progettazione dell'Architettura

jj_mele@hotmail.com

Le relevé et les élaborations ont été faits pendant les journées de l' « Ecole Nationale de Doctorat en Sciences de la Représentation et du Relevé », 3-8 Juillet 2006

2-[Gena,02] :**Simulation du comportement des voûtes d'ogives gothiques**Rapport final de recherche 2002

Contrat n° 97 5620 017

Alain Chassagnoux

François Guéna

Louis Paul Untersteller

email : ariam@paris-lavillette.archi.fr

Web/ Bibliographie

http://architecture.relig.free.fr/arch_ma.htm

http://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_gothique

http://fr.wikipedia.org/wiki/Villard_de_Honnecourt

<http://villarddehonnecourt.free.fr/carnet.htm>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Arc>

<http://perso.orange.fr/revue.shakti/gothique.htm>

<http://www.clioetcalliope.com/medieval/gothique/gothiquemenu.htm>

Mémoire Master MSEB Modélisation paramétrique d'une voûte gothique

http://pros.orange.fr/quatuor/art_gothique_15eme_00.htm
http://www.walloniebruxelles.org/mot.nsf/Dossiers/Art_gothique
<http://college.bayard.free.fr/art-gothique.htm>
<http://hamidache.iquebec.com/glossaire.html>
<http://pedagogie.ac-toulouse.fr>
<http://architecture.relig.free.fr>
<http://www.histoire-en-ligne.com>

Glossaire

Abbaye : monastère dirigé par un(e) abbe(sse).

Abside : extrémité semi-circulaire ou polygonale d'une nef.

Angevine (voûte) : voûtes très bombées; de sorte que la clef de voûte est plus élevée que la clef des arcs formerets et doubleaux.

Arcature : décor architectural constitué d'un ensemble d'arcades.

Arc-boutant : arc extérieur à l'édifice, accolé à un mur pour transférer la poussée d'une voûte vers un pile de pierre appelée culée. Les arcs-boutants peuvent être à deux niveaux et/ou à double volée. Il s'agit d'une invention romaine. Leur première utilisation dans les églises de France date de 1125, suite à l'effondrement de la voûte de Cluny. Cet outil architectonique, jugé initialement peu séduisant, se généralise progressivement avec le gothique et son esthétique s'améliore.

Arc brisé : arc composé de deux arcs de cercle.

Arc de décharge : arc placé au-dessus d'un linteau ou d'arcades pour les aider à supporter le poids du mur qu'ils soutiennent

Arc diaphragme: mur intérieur en pignon monté sur arc transversal, pour porter les pannes de la charpente. (définition extraite du *petit glossaire pour la description des églises*, Jean Cabanot).

Arc doubleau : arc séparant deux parties de voûte ou renforçant un berceau.

Arc à double rouleau : arc à double rangée de claveau.

Arc en accolade : arc formant une accolade. Les arcs en accolade sont d'origine extrême-orientale. On les trouve surtout dans l'art bouddhique. En Occident, ils apparaissent d'abord dans des décors de tombeaux. Ils se répandent ensuite sous des formes diverses en Angleterre. On les voit dans des décors gothiques flamboyants et dans l'architecture civile, surmontant des fenêtres à meneaux.

Arc en mitre : arc non ogival, formant un angle

Arc en plein cintre : arc en demi cercle.

Arc en tiers-points : arc brisé dans lequel on peut inscrire un triangle équilatéral.

Arc formeret : arc placé à la rencontre d'une voûte avec le mur portant.

Arc outrepassé : voir outrepassé

Arc réhaussé : arc dont les premiers claveaux forment un alignement vertical (comme un prolongement des colonnes sur lesquelles il repose) avant de se rejoindre, de sorte que sa hauteur est supérieure à son diamètre

Architrave : dans une colonnade, pièce rectiligne de longue portée reposant sur les colonnes par l'intermédiaire des chapiteaux.

Archivolte : arc qui surmonte l'ensemble des voussures

Mémoire Master MSEB Modélisation paramétrique d'une voûte gothique

Chapelle : La chapelle peut être un lieu de culte intégré à un établissement (château, collège, hôpital, monastère ...). Dans une église, c'est un espace pour un culte secondaire, dédié à un saint particulier. Enfin, cela peut être une église qui ne constitue pas une paroisse (du fait souvent de la présence d'une autre église proche qui remplit ce rôle).

Chevet : extrémité orientale d'une église, partie extérieure du **choeur** ou de l'**abside**.

Chapelle : La chapelle peut être un lieu de culte intégré à un établissement (château, collège, hôpital, monastère ...). Dans une église, c'est un espace pour un culte secondaire, dédié à un saint particulier. Enfin, cela peut être une église qui ne constitue pas une paroisse (du fait souvent de la présence d'une autre église proche qui remplit ce rôle).

Chapiteau : pierre qui couronne le fût d'une colonne, généralement composé d'un tailloir et d'une corbeille (voir ces mots). Les chapiteaux portent généralement un décor. Celui-ci peut-être composé de simples feuillages (feuilles d'acanthé ou crochets, très répandus dans l'art gothique), de compositions végétales complexes, d'animaux étranges ou de scènes historiées (décor plus fréquents dans l'art roman). Plus rarement, le chapiteau est cubique et sans décor (art carolingien) ou à **godrons**.

Châsse ou reliquaire : coffre souvent très richement orné ou l'on garde les reliques d'un saint. Les châsses peuvent prendre toute sorte de formes (main, statuettes, croix...). Cf. **reliques**.

Chauffoir : c'est la seule pièce chauffée de l'abbaye. Elle était essentielle l'hiver pour les malades et souvent accolé au scriptorium pour que l'encre des moines copistes ne gèle pas. Parfois le chauffoir faisait lui-même office de scriptorium.

Chevet : extrémité orientale d'une église, partie extérieure du **choeur** ou de l'**abside**.

Choeur : partie d'une église qui abrite l'autel et dont l'accès est réservé au clergé. Stricto sensu, c'est la partie droite entre le **transept** et l'**abside**, même qu'il par extension, il peut désigner l'ensemble. Dans les cathédrales, il est très souvent entouré d'un **déambulatoire**, dont il est séparé soit par une grille, soit par des clôtures (de bois ou de pierre), et de chapelles. Le choeur a souvent été, également, séparé de la **nef** par un jubé, ce qui rompait l'unité de l'espace dont on bénéficie désormais en entrant dans la plupart des cathédrales. Aujourd'hui, cet isolement complet du choeur ne se retrouve guère que dans les cathédrales espagnoles (coro). Voir **clôture**, **jubé**.

Chrisme : monogramme du Christ, formé des deux premières lettres de son nom en grec (X, P) ainsi que de l'alpha et de l'omega.

Cintre : voir **arc en plein cintre**

Claveau : pierre entrant dans la composition d'un arc.

Clef de voûte : pierre placée à l'intersection des nervures qui soutiennent une **voûte**. La clef peut être pendante (exemple de la première chapelle sur la partie droite du déambulatoire de la cathédrale de Senlis).

Clocheton : petit clocher ornant la base d'une flèche ou les angles d'un édifice (exemple de la cathédrale de Rouen)..

Cloître : le cloître est constitué de quatre galeries encadrant un jardin. On trouve souvent deux points d'eau : un puits au centre (destiné à collecter les eaux de pluie) et un lavabo sur l'un des côtés (pour les ablutions). C'est à la fois un lieu de méditation et un lieu de passage. Dans les monastères, la salle **capitulaire**, l'église, le réfectoire (entre autres) ouvrent souvent sur le cloître.

Claire-voie : ensemble des fenêtres éclairant un vaisseau.

Collégiale : église qui, sans être une cathédrale, possède un chapitre de **chanoines**.

Collatéral : **nef** latérale d'une église. Si sa hauteur est inférieure à celle de la nef principale, elle est nommée **bas-côté**.

Colonne : support (pilier) généralement cylindrique. Les colonnes peuvent être monolithes ou composées de plusieurs tambours. Elles sont adossées lorsqu'une petite partie de leur fût est noyée dans la maçonnerie d'un pilier ou d'un mur. Elles sont engagées lorsqu'il n'y a plus qu'une demi-colonne qui ressort de la maçonnerie. Elles sont cantonnées quand elles se glissent dans les angles rentrant d'un pilier cruciformes. Elles sont fasciculées lorsque qu'elles sont réunies en faisceau. Elles sont accouplées lorsqu'elles se présentent par deux

Console : socle sur lequel repose une statue ou une **ogive** qui ne retombe pas sur une colonne.

Contrefort : massif maçonné, formant une sorte de pilier engagé, assurant la stabilité d'un édifice en lui apportant un appui extérieur. Voir **arc-boutant**, **culée**.

Corbeau : pièce en saillie sur un mur, ayant un rôle de support. Le corbeau n'a pas la fonction décorative des **modillons**, cul-de-lampes ou **consoles**.

Corbeille : dans un **chapiteau**, partie principale autour de laquelle se déploie un décor géométrique, végétal ou historié.

Cordelière : élément décoratif sculpté en forme de corde

Coupole : **voûte** hémisphérique lorsque la coupole est construite sur un plan carré ou octogonal, le passage du carré ou de l'octogone à la sphère se fait par le biais de trompes ou de pendentifs

Crochet : ornement en forme de crosse végétale, de bourgeon recourbé.

Croisade des albigeois : voir **catharisme**.

Croisillon : le terme croisillon, selon certains spécialistes, ne devrait être employé que pour désigner la traverse d'une fenêtre à **meneaux**. Cependant, son acception la plus courante est celle qui désigne le bras du **transept**, et c'est dans ce sens que nous l'employons.

Crypte : espace généralement aménagé en dessous du choeur et qui abrite les corps de saints et parfois de rois.

Culée : élément de maçonnerie destinée à contenir la poussée d'un arc, d'une **voûte**. La culée est aussi appelée pile.

Cul-de-four : voûte formée d'une demi-coupole (quart de sphère). Lien sur la photo du choeur de Sant Jaume de Frontanya, Catalogne.

Culot : support d'une retombée d'**ogive** lorsque celle-ci ne repose pas sur une colonne.

Déambulatoire : à l'origine, couloir inventé par Grégoire le Grand pour permettre de circuler autour des reliques. Il s'agit plus généralement d'une galerie entourant le **choeur** et reliant les bas-côtés. Cette galerie sera progressivement dotée de chapelles rayonnantes (Xe ou XIe siècle), associant des **reliques** à un autel. L'ensemble s'inscrit dans un mouvement de reconquête de l'espace par le fidèle, qui date de l'époque romane. En édifiant des chapelles rayonnantes autour d'un déambulatoire, on libère de la place en avant du **chevet**.

Gâble : couronnement triangulaire au-dessus d'une baie ou de l'**archivolte** d'un portail. Voir **pignon**.

Harmonique (façade) : inventée par les architectes normands au milieu du XIe siècle, la façade harmonique est d'une composition assez simple. C'est un rectangle divisée en trois parties - avec chacune un portail - dont la plus large se trouve au centre. Les deux parties latérales sont surmontées de tours abritant les cloches et qui sont normalement symétriques. Ce type de façade permet un accès plus direct du fidèle à la cathédrale.

Intrados : surface intérieure d'un arc ou plutôt d'un ensemble d'arcs (**voussures**). Si beaucoup d'intrados romans ne sont pas ornés (comme à Moissac), les intrados des portails gothiques le sont quasiment tous.

Lancette : baie étroite, se refermant en arc brisé.

Lanterne (tour lanterne) : tour ajourée permettant de faire pénétrer la lumière dans un édifice religieux. On la trouve le plus souvent à la croisée du **transept**, même si elle peut être placée ailleurs (à l'entrée ou dans une **abside** latérale).

Outrepassé (arc) : arc en fer à cheval dont la courbe dépasse celle du demi-cercle, le diamètre de l'arc étant plus large que l'espace entre les piliers qui le soutiennent.)

Pendentifs (coupole sur) : coupole élevée sur quatre triangles sphériques concaves qui permettent le passage du plan carré au plan circulaire. On en trouve, par exemple, à Talmont (croisée du **transept**), à St Pierre de Saintes (**croisillons** du transept), à Ste Marie des Dames de Saintes (**nef**)...

Perpendiculaire (gothique) : ce terme désigne l'art gothique anglais du XVe siècle (approximativement). Il se caractérise par l'enchevêtrement des nervures des voûtes et de grandes verrières. Le choeur de la cathédrale d'Oxford en est un exemple.

Phylactère : banderole à extrémité enroulée sur laquelle est inscrite un texte ou les paroles d'un personnage.

Piédroits : parties verticales d'une ouverture.

Pignon : couronnement souvent triangulaire d'un mur dont le sommet porte le bout d'une toiture. Ce type d'ornement triangulaire est appelé gâble lorsqu'il ne se trouve pas au niveau du toit et décore une autre partie d'une façade. Voir **Gâble**.

Pilastre : pilier rectangulaire en saillie sur un mur; purement décoratif. Il peut comporter un chapiteau.

Pile : voir **culée**.

Pilier : les piliers supportent la poussée verticale des **voûtes**. Ils peuvent affecter plusieurs formes simples (cylindriques, rectangulaires, cruciformes) ou complexes lorsque des **colonnes cantonnées** viennent se glisser dans les angles rentrants d'un pilier cruciforme et que des colonnes engagées s'ajoutent aux extrémités de la croix, ce qui donne l'impression d'un faisceau de colonnes. Un pilier rectangulaire est dit cantonné lorsqu'il reçoit des colonnes engagées à ses angles saillant. Les piliers se composent généralement de trois éléments : une base, un fût et un **chapiteau**. Les chapiteaux sont presque toujours ornés, la base l'est parfois et le fût rarement.

Mémoire Master MSEB Modélisation paramétrique d'une voûte gothique

Pinacle : couronnement d'un massif de maçonnerie vertical servant d'une part à améliorer par son poids la stabilité de l'ensemble et d'autre part à décorer les renforts

Viollet-le-Duc (Eugène Emmanuel, 1814-1879) : vivement critiqué pour ses restaurations jugées parfois abusives et ses théories sur l'architecture médiévale, Viollet-le-Duc, incontournable, est aujourd'hui en cours de réhabilitation. Autodidacte, Viollet-le-Duc est aidé dans sa carrière par Mérimée, qui lui confie en 1840 son premier chantier, Vézelay. Il poursuit sa carrière sous le Second Empire, restaurant, créant, écrivant (*Dictionnaire raisonné de l'architecture française*). La chute de l'Empire et la mort de Mérimée l'éloignent de la sphère officielle. Il meurt à Lausanne. Ses principales interventions ont eu lieu sur les cathédrales d'Amiens, Reims, Paris, Clermont-Ferrand, Autun, Auxerre, Saint-Denis, Lausanne, sur Saint Sernin de Toulouse, sur les remparts de Carcassonne, le château de Pierrefonds (Oise)... Viollet-le-Duc a une conception particulière de la restauration : «Restaurer un édifice, écrit-il, ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné.» Cette idée essentielle s'articule autour de plusieurs conditions : assurer la durée de l'édifice, ne pas refuser systématiquement des adaptations aux usages modernes, tenir compte des aménagements antérieurs, s'appuyer sur des documents scientifiques et des études archéologiques. Dans l'ensemble, les restaurations de Viollet-le-Duc sont plutôt réussies. Elles ont assuré la pérennité de biens des monuments en danger, sans les déformer (seule la restauration de Saint-Sernin est considérée comme moins réussie). Si l'exécution de ses plans souffre parfois de médiocrité, cela est dû à l'insuffisance de ses collaborateurs, plutôt qu'à des erreurs de conception de sa part.

Volée (arc-boutant à double volée) : type d'**arc-boutant** comportant une **pile** intermédiaire avant la **culée**.

Voûtures : arcs concentriques en retrait les uns par rapport aux autres au-dessus d'un **portail** ou d'une fenêtre. Les voûtures sont surmontées d'un **archivolte**

Villard de Honnecourt : né autour de l'an 1200, est originaire du village de Honnecourt-sur-Escaut situé près de Cambrai. Comme les compagnons de son temps, il fait son apprentissage en allant de ville en ville et de chantier en chantier. Il deviendra plus tard magister latus, c'est-à-dire maître d'œuvre, profession qui englobe le métier d'architecte. Son activité professionnelle couvre les années 1225 à 1250.

Église abbatiale Sainte-Marie : bâtie vers 920 dont la construction dura plus d'un siècle. Elle est en rapport avec l'abbaye double Notre-Dame-de-Morienvall fondée, selon la légende, par Dagobert Ier, éteinte en 1744. Bien que les chapiteaux soient grossiers, les arcades ouvrant sur le chœur sont ogivales

La cathédrale Saint-Étienne de Sens, est considérée comme la première des cathédrales gothiques.

Cathédrale Saint-Étienne de Sens : Vers 1135, l'archevêque Henri Sanglier décide de remplacer la cathédrale du Xe siècle, par un édifice grandiose et digne de l'importante métropole sénonaise. Au moment où s'élèvent partout des constructions romanes, Henri Sanglier appelle un architecte novateur qui va proposer une conception révolutionnaire du voûtement, la croisée d'ogives.

L'église a été construite entre 1065 et 1077. La conquête de l'Angleterre, en 1066, en apportant des moyens supplémentaires, mais aussi la présence de carrières de pierre à ciel ouvert à proximité, expliquent la rapidité de cette construction

la basilique Saint Denis : La construction de l'église carolingienne est initiée par l'abbé Fulrad et s'achève en 775, grâce à l'aide de Charlemagne. L'édifice est alors composé d'une nef à trois vaisseaux et de neuf travées et s'achève par une abside surélevée, en raison de la présence d'une crypte : ceci annonce le schéma actuel. L'abbatiale est agrandie à l'est en 832.

La cathédrale Notre-Dame de Senlis : Commencée en 1151, la cathédrale possède déjà son chœur et sa façade occidentale vers 1167. La dédicace a lieu le 16 juin 1191. C'est ensuite que les délais s'étirent. La cathédrale était initialement dépourvue de transept, ce qui correspondait à une tentative d'affranchissement du plan en croix latine qu'on retrouve notamment à Bourges

Notre-Dame de Noyon : est un édifice dont l'influence fut déterminante dans l'évolution du gothique primitif, notamment parce qu'il est considéré comme le premier exemple achevé d'élévation à quatre niveaux (Saint-Germer de Fly constituant le prototype de ce type d'élévation).

L'évêché de Saint Quentin est transféré à Noyon par Saint Médard en 531. Il est le cadre de plusieurs grands événements historiques, comme le sacre de Hugues Capet par l'archevêque de Reims, en 987. Trois cathédrales se succèdent avant la construction de l'édifice actuel. En 1131, l'édifice carolingien brûle. Ajouté au transfert des reliques de Saint Eloi, qui fait de Noyon un lieu de pèlerinage, cet événement conduit à envisager la reconstruction gothique de l'église vers 1148

Saint Germer de Fly : abbaye de la première génération gothique, non par ses dimensions ou sa beauté mais par son caractère novateur. Son élévation à quatre niveaux serait peut-être antérieure à celle de Noyon, même si cette dernière demeure incontestablement le premier exemple vraiment accompli d'élévation de ce type.

Notre dame de Laon : La construction de la cathédrale gothique est envisagée vers 1160. Laon est donc l'une des premières cathédrales gothiques (après Saint Denis, Sens, Noyon, Senlis et contemporaine de Notre-Dame de Paris). La nef est achevée à la fin du XIIIe siècle, les tours des transepts en 1225. La façade est terminée en 1245.

Notre dame de chartre : Cinq édifices précèdent la construction de la cathédrale actuelle. Le dernier édifice avait été érigé entre 1020 et 1037, à l'initiative de l'évêque Fulbert. Un incendie, en 1134, détruit des bâtiments proche de la cathédrale mais épargne cette dernière. On décide alors de profiter de l'espace dégagé pour procéder à des transformations. On élève alors la façade actuelle devant l'église de Fulbert. Initialement, l'accès à la cathédrale se faisait par les tours. Vers 1145-55, on décide de faire de la façade en cours d'édification une façade harmonique, sans pour autant détruire ce qui avait déjà construit. Un mur est construit dans l'alignement des deux tours. On y perce les trois portails du Portail royal que l'on peut admirer actuellement. En 1194, un second incendie détruit l'église romane, ne laissant intact que la crypte et la façade. La construction d'un édifice gothique est alors engagée.

Saint Etienne de Bourges : la première église dédiée à St Etienne date du IIIe siècle. Plusieurs édifices se succèdent ensuite, parmi lesquels on trouve une cathédrale romane datant du début du XIe siècle. Le début de la construction de la cathédrale actuelle est difficile à dater avec certitude. On le situe généralement en 1195. La nef est presque achevée en 1265. Dans l'ensemble, la cathédrale devait être achevée avant le début du XIVe siècle, bien que la dédicace n'ait eu lieu qu'en 1325. Certains éléments ont été ajoutés à la fin du XIVe siècle, dont le fenestration de la façade principale.

Notre-Dame d'Amiens : est la plus grande cathédrale gothique du monde (200 000 m³ soit 2 fois Notre-Dame de Paris en volume) et l'une des plus belles puisqu'elle est classée au Patrimoine mondial de l'humanité. C'est l'incendie de la cathédrale romane (qui datait de 1152) en 1218 qui provoque la construction d'une cathédrale gothique. Les premières pierres sont posées en 1220, dans un contexte de grande prospérité. Contrairement à la tradition, les architectes commencent par construire la façade et la nef. L'édification est assez rapide puisque l'essentiel est fait à la fin du XIIIe siècle : cela confère à Notre-Dame d'Amiens une unité architecturale qui manque à beaucoup de ses rivales.

Notre Dame de Reims : est élevée sur le site d'anciens thermes en 401 par Saint Nicaise (qui subit ensuite le martyre et meurt décapité). Reims occupe tout de suite une place importante puisque Clovis y est baptisé en 496. C'est à partir du couronnement de Louis le Pieux en 816 qu'est affirmée la vocation des évêques de Reims à couronner les rois (Reims sera véritablement un passage obligé à partir de Philippe Ier en 1029).