

Modélisation BIM d'une famille variable de voussoir et de ses étapes de taille pour la vis Saint-Gilles

Raphaël Vouilloz^{1,*}, and *Philippe Marin*¹

¹Univ. Grenoble-Alpes, ENSAG*, MHA, 38000 Grenoble, France

* School of Architecture Univ. Grenoble-Alpes

Résumé. La vis Saint-Gilles est un des plus célèbres objets de la stéréotomie, abondamment documenté dans les traités de la Renaissance et célébré pour sa singulière complexité géométrique. Cet article revisite ce modèle sous l'angle des procédés numériques BIM ; il propose une méthode pour créer une famille variable à pilotes géométriques et paramétriques capable de prendre la forme de chacune des occurrences de voussoirs constituant l'assise d'une vis Saint-Gilles donnée. Au-delà de la géométrie, cet objet « non standard » embarque étapes de tailles et nomenclature de bloc englobant dans une chaîne associative de documents allant de la conception à la fabrication.

Mots-clés. BIM, stéréotomie, non standard, paramétrique, fabrication

Abstract. The vis Saint-Gilles is one of the most famous objects of stereotomy, abundantly documented in Renaissance treatises and celebrated for its singular geometric complexity. This article revisits this model from the perspective of digital BIM processes; it offers a method for creating a variable family with geometric and parametric drivers capable of taking the form of all voussoir occurrences in any vis Saint-Gilles. Beyond geometry, this « non standard » object embeds cutting steps and stone schedules in an associative chain of documents from design to fabrication.

Keywords. BIM, Stereotomy, Non-standard, Parametric, Fabrication.

1 Introduction

Cet article présente une méthode pour intégrer dans une maquette BIM, à partir d'une famille variable, les étapes de taille et blocs englobants des voussoirs constituant l'assemblage d'un

* Corresponding author: vouilloz.r@grenoble.archi.fr

objet remarquable de la stéréotomie : la vis Saint-Gilles. La stéréotomie s'appuie sur des principes géométriques et s'accompagne d'une logique de déclinaison et de variation de ses composants. Ce processus résonne avec les approches paramétriques contemporaines. Il s'agit alors de penser et d'adapter nos procédés numériques à l'architecture en pierre de taille et à ses spécificités, en considérant les activités qui vont de l'extraction en carrière à la fabrication de chacun des voussoirs. La stéréotomie est importante pour la restauration du patrimoine, particulièrement en France, et relève également d'enjeux environnementaux. C'est une ressource habituellement considérée comme illimitée, renouvelable, et peu énergivore [1] ; certaines communautés en font le levier principal de leur stratégie de construction durable [2]. Cette recherche propose au travers de la vis Saint-Gilles, un modèle didactique et historique, des procédés numériques automatisés de constructions géométriques, qui facilitent l'intégration des données pour constituer une information et accompagner la prise de décision. Un premier enjeu est de modéliser le tracé géométrique de ce patrimoine bâti à partir de traités de la Renaissance, afin de l'interpréter dans l'espace et de le faire varier ; un deuxième enjeu est l'application de techniques numériques récentes à un procédé de conception et de fabrication traditionnel.

Cet article présente une approche paramétrique du BIM pour la pierre de taille qui accommode non standard et préfabrication. Dans un premier temps, nous considérons les usages du BIM pour la stéréotomie et les spécificités des approches non standard ; ensuite, nous présentons l'hypothèse et l'objectif de la recherche, accompagnés d'un éclairage historique de notre cas d'étude ; dans un dernier chapitre, nous détaillons nos travaux de modélisation numérique.

2 Le BIM pour la stéréotomie

Le numérique s'accompagne d'un nouveau paradigme et permet une réinterprétation contemporaine de la stéréotomie. Avec l'expression *Building Information Modeling*, nous croisons les principaux enjeux de ce principe constructif. L'*information* renvoie à la notion de donnée organisée. Antoine Picon relie les origines de l'ordinateur à la nécessité pour les sociétés modernes de développer des instruments et des outils facilitant l'organisation de données massives [3]. La stéréotomie organise un ouvrage par l'assemblage de très nombreuses pièces, elle implique une gestion rigoureuse des données, en allant de l'extraction à la pose de chacun de ses éléments. Mario Carpo précise que l'architecture a d'abord appréhendé le tournant numérique comme une révolution géométrique [4], avec la *modélisation* et la capacité de l'ordinateur à calculer rapidement les formes géométriques en trois dimensions. La stéréotomie constitue une discipline étroitement associée au domaine de la géométrie, elle profite des techniques pour représenter et calculer ses composantes en évitant l'abstraction des constructions géométriques en 2D et les représentations successives des différentes projections.

2.1 Le paradigme de l'architecture non standard

Ainsi Carpo offre une perspective historique des relations entre standardisation et économie d'échelle [5]. Chaque répétition d'un même produit fabriqué industriellement diminue le prix par pièce de l'ensemble de la série. Cette approche conduit à construire avec des produits préfabriqués choisis sur catalogue, la poutre en acier étant le symbole de cette épistémè. La personnalisation de masse, à savoir la capacité de concevoir et fabriquer en série des objets

uniques, ou non standards, redistribue les cartes en réouvrant la porte à des méthodes plus artisanales, avec des matériaux plus hétérogènes. La pierre retrouve une place dans ces processus.

En 2003, l'exposition *Architectures non standard* constitue un moment remarquable de l'histoire du numérique en architecture [6]. Si cet événement rassembleur laisse entendre une homogénéité dans les approches des avant-gardistes du numérique en architecture, la chercheuse Florence Plihon observe des différences notables dans leur définition du non standard [7]. Bernard Cache et Patrick Beauce formulent des limites quant à l'utilisation du numérique à des fins uniquement sculpturales risquant de complexifier inutilement la construction d'un bâtiment et négligeant son contexte économique, historique ou social. Ils préfèrent son inscription dans une démarche intégrant une chaîne de production de l'architecture allant de la conception à la fabrication et préfigurant une démarche BIM. Ils soulignent en effet le potentiel du numérique pour organiser et automatiser le flux d'informations nécessaires au projet et à la réalisation d'une construction, en évoquant en particulier la possibilité de supprimer tout intermédiaire entre le concepteur et la machine [8]. C'est le sens de ce que Gilles Deleuze et Bernard Cache appellent « objectile ». Dans le champ de la stéréotomie, Giuseppe Fallacara nomme ce concept « *serial uniqueness* » [9]. Proposant dans sa thèse la modélisation 3D de nombreux objets stéréotomiques, dont la vis Saint-Gilles, il poursuit ses recherches au Polytechnique de Bari et produit plusieurs ouvrages, articles scientifiques et réalisations inscrits dans un projet qu'il nommera *Stereotomy 2.0* [10]. D'autres unités de recherche comme le GSA à Paris-Malaquais [11], ou le Block Research Group à l'ETHZ [12] revisitent cette discipline en intégrant les techniques paramétriques et la fabrication assistée par ordinateur. Des chercheurs exploitent la nature intrinsèquement variationnelle de la stéréotomie, par exemple en réinterprétant la célèbre voûte plate d'Abeille [13,14]. Cet article complète ces approches en proposant une maquette BIM paramétrique s'inscrivant dans une chaîne associative de documents allant de la conception à la fabrication.

2.2 La pierre de taille, un matériau non standard

La stéréotomie concilie deux aspects a priori contradictoires : un processus de préfabrication et l'usage d'un matériau hétérogène et peu standardisable. L'ouvrage est par essence préfabricable, puisque l'assemblage est composé d'éléments, les voussoirs, qui doivent être taillées à l'avance. Mais il repose sur un matériau par nature hétérogène et donc peu standardisable, les carrières ayant à disposition des quantités restreintes de strates de pierre d'une épaisseur donnée. Deux exemples illustrent cela. Les récentes restaurations de la cathédrale Notre-Dame à Paris ont révélé des variations dans les dimensions des voussoirs composant les nervures des voûtes gothiques [15]. Pourtant pour Roland Bechmann [16], le système gothique est pensé dans un principe de standardisation : toutes les nervures composant la voûte sont des arcs de cercle de même rayon pour produire en série leurs voussoirs en carrière, indépendamment de leur positionnement dans l'assemblage. Les variations constatées à Notre-Dame apparaissent d'abord purement arbitraires ; mais selon les chercheurs intervenus dans cette restauration, elles révèlent une approche plus subtile, répondant empiriquement à la disponibilité des blocs au regard des lits d'extraction dans les carrières alentour. Un projet contemporain révèle la même nécessité d'adaptation face aux contraintes de disponibilité de la matière. Dans son analyse d'un récent ensemble de logements en pierre massive dans le canton suisse de Genève, la chercheuse Natalia Petkova

[17] rapporte que l'extraction des grands blocs demandés par les architectes, tous de la même hauteur et certains mesurant plus de 2,5 mètres, s'est avérée difficile et a généré des déchets considérables pour le carrier. Ainsi il s'agit d'envisager comment un matériau hétérogène peut être incorporé dans les processus de production architecturale.

3 Hypothèse, objectif et cas d'étude

Ce chapitre met en lumière la valeur intrinsèquement variationnelle de la stéréotomie. L'hypothèse est que ces logiques et ces méthodes sont transposables aux outils numériques et paramétriques les plus récents. Cette transposition est complétée par l'automatisation de la production de documents et d'informations à même de supporter une prise de décision architecturale intégrant l'hétérogénéité du matériau pierre. Enfin la vis Saint-Gilles est introduite comme cas d'étude, en présentant sa géométrie et son traitement dans les traités de la Renaissance.

3.1 La variation comme principe d'innovation en stéréotomie

Pour Philippe Potié, au travers de ses recherches sur Philibert Delorme, la dimension variationnelle caractérise la figure de l'architecte à la Renaissance et constitue un principe structurant de l'invention et de l'innovation constructive [18]. Philibert Delorme inventait de nouvelles formes de trompes ou d'escaliers en modifiant certains tracés de modèles classiques et connus des tailleurs de pierre. Aujourd'hui, intégrer paramétriquement les procédés de tracé et de taille à un modèle numérique permet d'abord de vérifier et commenter cette hypothèse. Ensuite, cette capacité de mise en variation présente des qualités et des valeurs projecturales pour la stéréotomie contemporaine.

Pour nos travaux il s'agit tout d'abord de constituer une connaissance sur un ouvrage de l'histoire de l'architecture à travers un processus de remodelisation. Cette approche nous permet d'envisager les procédés et logiques constructives mise en œuvre à l'époque pour permettre la réalisation de l'ouvrage. Nous comparons ainsi des chapitres de traités de stéréotomie qui abordent cet assemblage, selon différentes méthodes de tracé et de taille de pierre. Leurs auteurs y abordent de manière confondue la représentation de l'objet et ses étapes de fabrication. Ces explications détaillées par du texte et illustrées par des dessins en deux dimensions, sont reproduites numériquement étape par étape afin de paramétrer la séquence des opérations. Notons que ces constructions géométriques sont déjà intrinsèquement variationnelles dans les traités : les segments, rayons ou angles ne sont pas cotés et le dessin procède uniquement par rapports géométriques. Ensuite, l'enjeu est d'interpréter en 3D ces manipulations, afin d'en vérifier la cohérence dans l'espace et de commenter leur nature géométrique.

Par ailleurs, nous cherchons à décliner les principes de conception et de construction de la stéréotomie en considérant les approches et les instrumentations numériques émergentes. Aujourd'hui, les méthodes de fabrication des tailleurs de pierre sont mixtes, entre procédés manuels et mécanisation. Ainsi, l'étude des traités anciens reste pertinente dans la mesure où elle questionne la forme d'un voussoir fini comme résultat d'une succession d'étapes de taille opérées dans un bloc englobant, impliquant la définition géométrique de l'objet, voire des outils et des mouvements opérés.

3.2 Production automatique de documents et d'informations

Dans un deuxième temps, ce travail de remodelisation est utilisé pour présenter une méthode numérique susceptible de répondre à la variabilité du matériau pierre dans un contexte contemporain. Cette séquence doit automatiser la documentation et l'information produite par la maquette numérique afin de supporter une prise de décision architecturale s'appuyant sur la comparaison de multiples variantes, par exemple en termes de quantitatifs de blocs englobants dans lesquels sont taillés les voussoirs. Ces variantes doivent être extraites automatiquement à partir d'une même maquette numérique. La méthodologie consiste donc à revisiter la vis Saint-Gilles, à partir d'un chapitre de traité, sous la forme d'une chaîne associative de documents intégrant conception, fabrication, et extraction de dessins et nomenclatures au sein d'un logiciel de CFAO.

3.3 Connaissance et histoire de la vis Saint-Gilles

Le travail de remodelisation de cet ouvrage historique de référence est mis en perspective avec les méthodes et procédés présentés dans les traités de stéréotomie accompagnant l'émergence de la discipline à la Renaissance. Ces démonstrations traitent simultanément des façons de tracer l'ouvrage pour le représenter et des techniques et outils nécessaires à sa réalisation. Cette imbrication entre conception et fabrication est directement transposable dans des logiciels contemporains de conception-fabrication assistées par ordinateur (CFAO). Ces procédés numériques sont démontrés à partir de la vis Saint-Gilles, un assemblage de stéréotomie célébré pour sa complexité ; géométriquement, sa surface principale se définit par un arc de cercle parcourant une hélice circulaire afin de soutenir un escalier dans une tour cylindrique. Elle constitue « une voûte en berceau hélicoïdale » [19]. Cela génère des géométries complexes à fabriquer et/ou à représenter.

3.3.1 La voûte en berceau hélicoïdal « paramétrique » : histoire et expérimentations

La vis est un des objets les plus régulièrement documentés dans les traités de stéréotomie publiés du XVI^e au XVIII^e siècle, de Philibert Delorme à Mathurin Jousse, François Derand, Jean-Baptiste de La Rue, Amédée-François Frézier (Figure 1) ou Jean Rondelet [20–25], sans compter les auteurs espagnols qui ont également apporté une grande contribution à la stéréotomie.

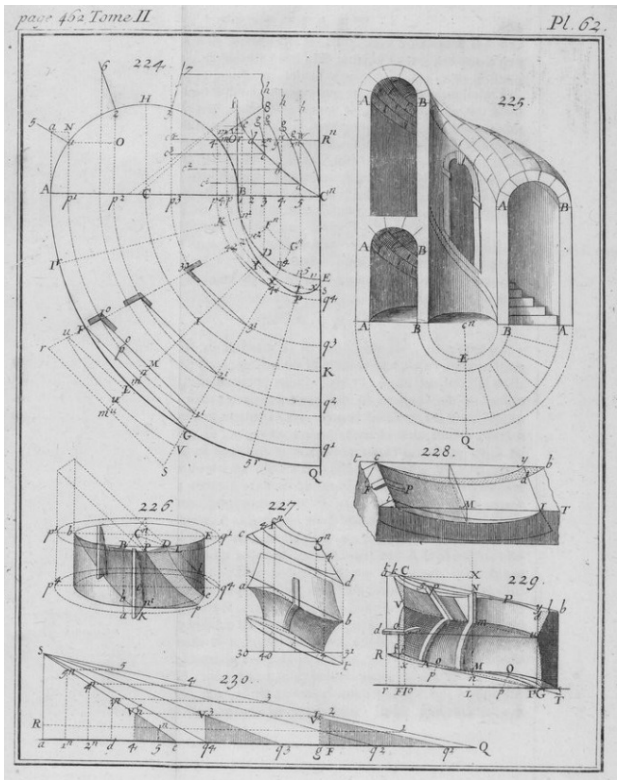


Figure 1. La vis Saint-Gilles dessinée par Amédée-François Frézier (BnF) [24]

La vis est également commentée dans la littérature scientifique contemporaine : dans cette abondante ressource, Pérouse de Montclos et José Calvo-López en retracent un historique [19,26], Fallacara en propose une modélisation paramétrique [27], Luc Tamboréro évoque des précédents au Caire et interprète les scénarios de taille des traités [28], Alberto Sanjurjo Alvarez intègre dans une étude de types d’escaliers en pierres un chapitre approfondi sur la vis à partir de traités et réalisations [29], enfin Calvo López *et al.* ou Maria Mercedes Bares effectuent des recherches sur quelques occurrences particulières [30,31].

Outre la fascination qu’exerce cet objet en raison de la complexité de sa réalisation, il faut noter sa valeur pédagogique et sa nature intrinsèquement paramétrique. Ainsi Rondelet la définit-il comme : « une espèce de voûte annulaire rampante, disposée pour soutenir les marches d’un escalier tournant autour d’un noyau plein ou évidé » [25]. Par « espèce de », nous interprétons que cet objet peut être obtenu par variation d’autres types de voûtes. Aussi Derand débute son chapitre sur cet objet en soulignant que « le trait de cette vis est un des plus difficiles », et invite à revoir antérieurement ces autres assemblages avec lesquels la vis présente « en quelques choses, du rapport, et en d’autres de la dissemblance » [22].

3.3.2 Géométrie des voussoirs

Deux types de courbes définissent la surface caractéristique d’une vis et in fine de son voussoir, à savoir son intrados, ou douelle, *ABCD* (Figure 2a) (cette définition peut valoir également pour l’extrados *EFGH*, mais qui est dessiné de différentes manières selon les auteurs, en fonction du rapport aux marches qui sont posées dessus). Un demi-cercle *c* sur plan vertical définit le berceau, et est à considérer comme la directrice de la surface ; une

série d'hélices circulaires telles que AD et BC , soit des courbes à double courbure, de même axe et même pas, mais de rayon variable en tout point de la surface, accompagnent l'ascension de l'escalier, et sont à considérer comme les génératrices. Ces courbes sont considérées dans cet ordre dans la mesure où la modélisation de cette surface dans cet article est présentée comme la mise en variation d'un demi-cylindre. Ainsi cet intrados $ABCD$ (et éventuellement l'extrados $EFGH$) décrit-il une surface à courbure négative. Ensuite, ces arêtes entre les voussoirs d'une même assise étant toutes des hélices circulaires, les lits, ou surfaces entre voussoirs d'une même assise, tels que $AEFD$ et $BGHC$ (Figure 2b), sont définissables par le balayage de joints droits, tels que $A'E'$ au long de ces hélices : ce sont donc des hélicoïdes. Ces hélicoïdes sont des surfaces gauches, à savoir des surfaces réglées non développables (de ce point de vue, le segment droit est à considérer comme génératrice et l'hélice comme directrice) et leur courbure est négative. En effet un seul cas d'hélicoïde est strictement développable, et donc à courbure nulle, lorsque la surface est engendrée par les tangentes à l'hélice, mais ce cas n'est pas en jeu dans la vis. Enfin les deux dernières faces d'un voussoir, les têtes, telles que $ABGE$ et $DCHF$ (Figure 2c), sont planes, contenues dans des plans normaux aux hélices. Ces plans intersectent donc en biais le berceau cylindrique, de sorte que les arêtes AB , EG , DC et FH sont des arcs d'ellipse.

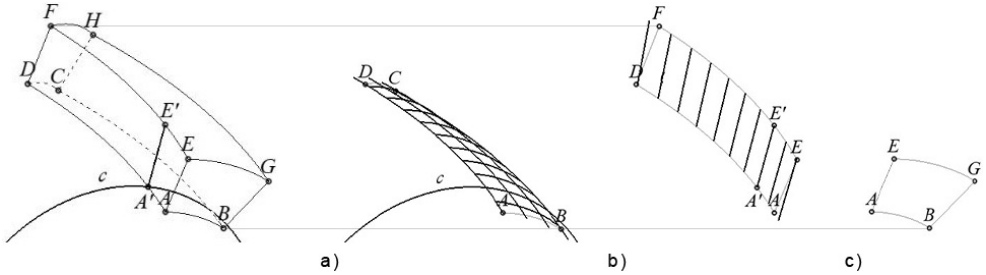


Figure 2. Géométrie d'un voussoir. Douelle (a), lit (b) et tête (c)

3.3.3 Taille par panneaux ou par équarrissement, entre savoir-faire pratique et scientification

Si de nombreuses méthodes de taille mixtes peuvent être utilisées, nous suivons ici le tailleur de pierre Gilbert Marguerite [32] en distinguant deux grandes méthodes traditionnelles envisageables pour une vis : la taille par panneaux et la taille par équarrissement. De fait, cette même distinction est présente chez la plupart des auteurs contemporains qui ont écrit sur la stéréotomie [33,34]. La différence fondamentale tient dans le repère définissant le bloc englobant du voussoir qui peut être :

- extrinsèque** aux voussoirs et défini par le repère absolu de l'espace dans lequel est plongée la voûte (taille par équarrissement, Figure 3a) ;
- ou **intrinsèque** à chacun des voussoirs et défini par un repère qui dépend de la géométrie de chacun des voussoirs de la voûte (taille par panneaux, Figure 3b).

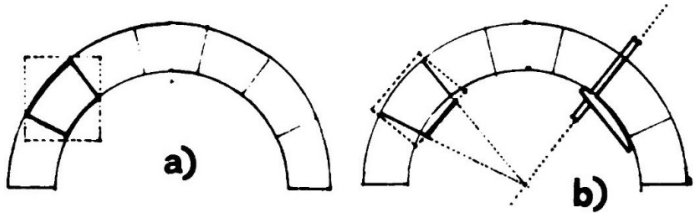


Figure 3. Positionnement du bloc pour la taille par équarrissement (a) et par panneaux (b) [33]

L'enjeu géométrique de la taille par équarrissement relève plutôt de la projection des arêtes du voussoir sur les faces du bloc englobant, tandis que la taille par panneaux cherche à construire le développé des surfaces du voussoir sur un support souple et plan qui peut être ensuite plié pour donner ou approximer la surface recherchée.

3.3.4 La vis Saint-Gilles par équarrissement selon Frézier

Dans nos travaux nous choisissons de modéliser cette voûte selon la méthode par équarrissement, telle qu'on la trouve bien décrite dans le traité de Frézier [24]. Il faut noter que, selon Calvo-López, tous les auteurs de traités se contentent de joints verticaux, contrairement aux règles de la stéréotomie et à ce que l'on observe dans les vis réellement construites (Figure 4a) ; seul Rondelet termine la construction par des joints entre chaque assise qui soient bien normaux à l'hélice ; mais ses explications sont très réduites contrairement à celles de Frézier (Figure 4b) [26]. Notons qu'un troisième type de joint est envisageable, à savoir une surface gauche toujours perpendiculaire à la surface hélicoïdale globale de l'escalier ; cette variante, bien que géométriquement la plus correcte, est complexe à mettre en œuvre et n'a donc jamais été réalisée dans l'histoire de la stéréotomie (Figure 4c).

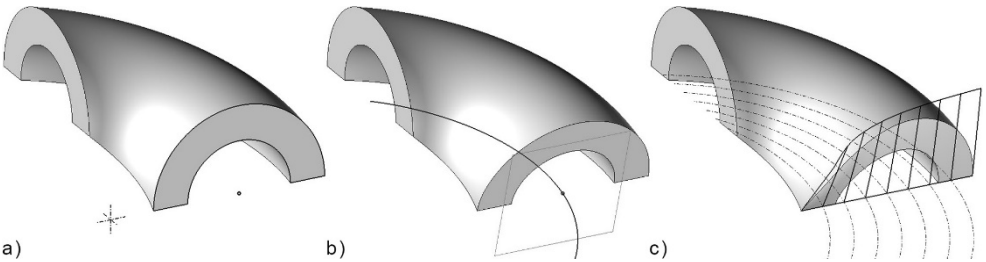


Figure 4. Types de joints pour la vis : vertical (a), normal à l'hélice (b), normal à l'hélicoïde (c)

Cet article complète donc le redessin de Frézier par les opérations de la deuxième méthode. Comme dans la majorité des traités, l'auteur explique la fabrication de l'objet en détaillant chronologiquement les étapes de dessin qui permettent de construire en 2D des éléments utiles à la taille effective qui s'opère bien entendu en trois dimensions dans l'espace réel : ces éléments sont, par exemple, des courbes à reporter directement sur le bloc ou servant à préparer des gabarits ou des biveaux. L'illustration est souvent construite en plusieurs dessins connectés sur une planche indépendante, et son organisation est empirique car la représentation en projection géométrale n'est pas encore standardisée. Ces dessins ne sont jamais cotés et procèdent uniquement de rapports géométriques, ils sont donc intrinsèquement variables. Ainsi la démarche de Frézier est-elle reconstituée dans un logiciel

paramétrique d’abord telle quelle, en 2D, avant d’y superposer une modélisation 3D interprétant dans l’espace chacune des opérations (Figure 5). Cette rétro-modélisation éclaire les opérations géométriques aptes à représenter numériquement les étapes de taille.

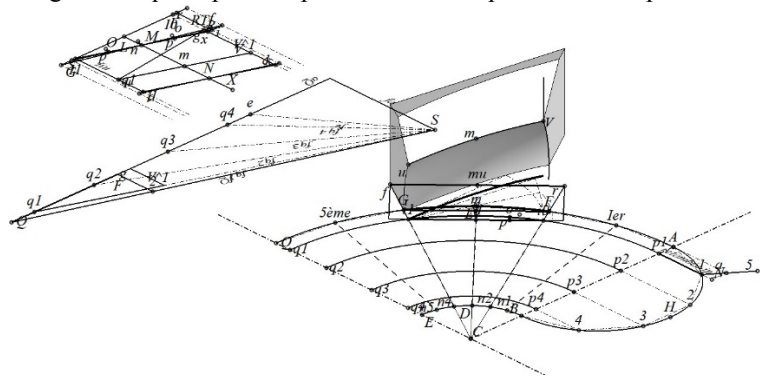


Figure 5. Redessin et modélisation de la vis Saint-Gilles d’après le traité d’Amédée-François Frézier

Le geste clé de la méthode présentée par Frézier consiste à utiliser un biveau, c’est-à-dire : une sorte d’équerre dont une ou les deux branches peuvent être courbes. Cet objet est illustré sur la planche de son traité (Figure 1, Figure 6). Ainsi pour une étape de taille donnée, il s’agit de tracer sur le bloc la future arête qui lui est tangente, par exemple l’hélice en pointillé sur la Figure 6. Cette courbe sert de « rail » au balayage du biveau, dont une branche peut s’appuyer sur une face déjà taillée à une précédente étape, et ce mouvement permet de vérifier la fabrication d’une surface à courbure négative en retirant le volume de pierre correspondant.

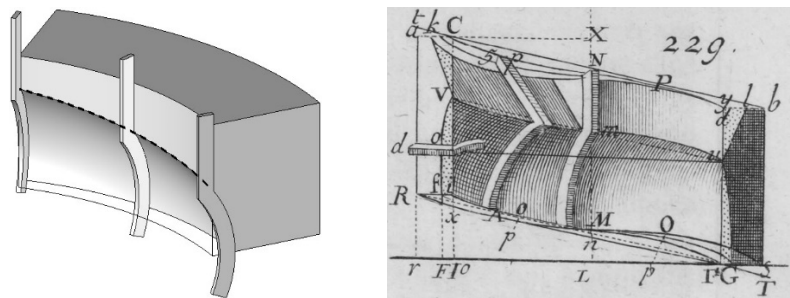


Figure 6. Biveau parcourant une hélice tracée sur le bloc, selon le dessin original de Frézier (Bnf) [24]

4 Processus et concepts numériques de la modélisation

L’objectif des procédés numériques présentés est de modéliser une famille variable de voussoirs pour toutes vis, embarquant les étapes de taille. L’intérêt est de ne concevoir qu’un seul modèle pour tous les voussoirs, dont les variations sont pilotables par des entités géométriques et des paramètres. Sur une même assise dans une vis, chaque voussoir est en effet formellement différent ; tous répondent pourtant aux mêmes propriétés topologiques présentées précédemment. Ces « invariants » sont donc transcrits dans un voussoir non standard, capable de prendre la forme de chacune des occurrences de l’assise une fois la pièce incluse dans l’assemblage.

Cette capacité de variation s’étend à l’assemblage : la famille de voussoirs peut s’adapter à n’importe quelle vis dont on changerait le pas ou les rayons intérieurs ou extérieurs ; de

plus, l'assemblage peut prendre la forme d'un berceau droit ou annulaire, horizontal ou rampant, et, par combinaison, hélicoïdale, jouant ainsi avec les variations suggérées par les auteurs de la Renaissance et soulignées précédemment. Au-delà de cette automatisation géométrique, les procédés présentés embarquent de la donnée et génèrent automatiquement de l'information. Des étapes de tailles sont représentées, dont les opérations géométriques sont également recalculées automatiquement pour chaque occurrence grâce aux pilotes géométriques et paramétriques. Des mises en pages sont produites automatiquement pour chaque occurrence selon un modèle prédéfini, ainsi qu'une nomenclature des blocs englobants minimaux pour tout type de voûte en berceau, annulaire, rampante ou hélicoïdale.

4.1 Modélisation exacte volumique et chaîne associative de documents

La modélisation est réalisée dans le logiciel de CFAO Top Solid. Deux caractéristiques de cet outil sont importantes pour cette recherche : la modélisation s'effectue en géométrie solide exacte (basée sur le noyau géométrique Parasolid), ce qui garantit des voussoirs fermés dont les volumes sont calculables, par opposition à de la modélisation polyédrique ou exacte surfacique [35]. Ensuite, une chaîne associative de documents s'opère de la conception à la fabrication : la modification d'une esquisse à la base d'une pièce rejoue l'ensemble des géométries et données produites de cette pièce jusqu'aux familles, assemblages et sur-assemblages dans laquelle elle est incluse, ainsi que dans tout document associé tels que les mises en plan, nomenclatures et usinages.

4.2 Paramétrisation de l'assemblage du berceau à la vis

Comme annoncé précédemment, la vis est interprétable comme mise en variation d'une voûte en berceau subissant deux transformations ; pour tout point parcourant la voûte, la 1^{re} transformation est une rotation d'axe vertical, résultant en un berceau annulaire, et la 2^e est une translation verticale, résultant en un berceau rampant. Ces deux opérations combinées génèrent un berceau hélicoïdal ; autrement dit, le segment droit générateur devient une hélice (**Figure 7**). Pour intégrer ces variations dans le modèle paramétrique, cette courbe fondamentale est définie par une équation basée sur 2 paramètres nécessairement variables : un paramètre booléen c définit si la voûte est de type rectiligne ($c=0$) ou annulaire ($c=1$), un paramètre réel de type longueur p définit le pas de l'hélice (le berceau est rampant dès lors que $p>0$) ; en outre un paramètre réel de type longueur r définit le rayon de l'hélice. L'équation paramétrique commune aux quatre configurations de voûte est ainsi :

$$\begin{aligned} X(t) &= r \times \cos(360^\circ \times t \times c) \\ Y(t) &= r \times \sin(360^\circ \times t) \times c - r \times t \times 4 \times (c-1) \\ Z(t) &= p \times t \end{aligned}$$

Trois autres paramètres variables sont définis pour matérialiser les voussoirs : un paramètre entier n définit le nombre d'assises sur 360° (et *in fine* la longueur du voussoir), un paramètre entier nv définit le nombre de voussoirs sur une assise, et un paramètre réel de type longueur e définit l'épaisseur entre intrados et extrados.

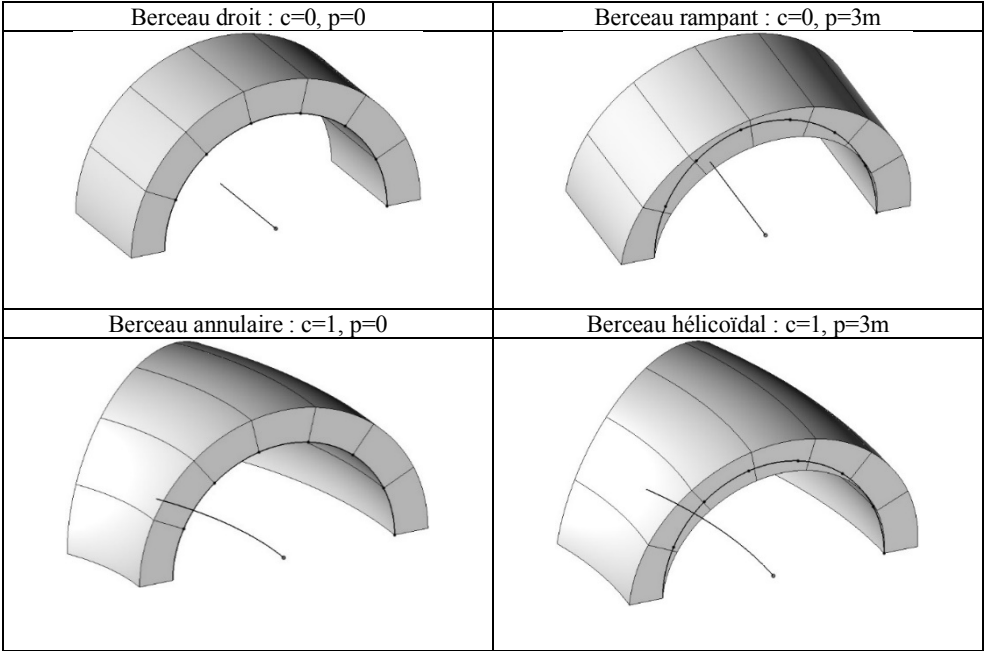


Figure 7. Mise en variation de l’assemblage du berceau droit au berceau hélicoïdal, ou vis

4.3 Famille variable de voussoir à pilotes géométriques et paramétriques

Le procédé principal réside dans la création d’une famille variable de voussoirs, capable de prendre la forme de chacune des occurrences constituant une assise de la vis, à partir de pilotes géométriques et paramétriques. C’est ce qui constitue l’*objectile* selon la définition de Deleuze et Cache, apte à réaliser cet objectif de variation en série. Un pilote géométrique est par exemple un point, un axe ou un plan constitutif de la génération d’une pièce. Lorsque cet élément est déclaré pilote, par exemple un point, il faut choisir, à l’inclusion de la famille dans l’assemblage, le point de l’assemblage à partir duquel le logiciel rejoue l’opération en question pour cette occurrence. De la même manière, un pilote paramétrique définit une valeur constitutive de la pièce, par exemple une valeur d’extrusion ou de congé, que le logiciel réinjecte dans la création de l’occurrence lorsqu’elle est placée dans l’assemblage.

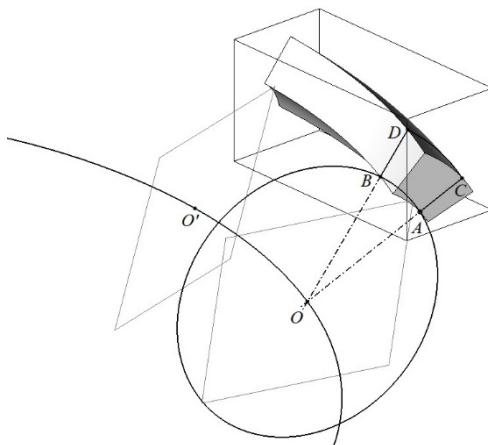


Figure 8. Modélisation de la famille variable de voussoir avec son bloc englobant selon Frézier

Le voussoir destiné à être converti en famille est modélisé par balayage de son profil, dessiné sur le plan vertical du berceau, au long du chemin de la voûte (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ; le résultat de ce balayage est ensuite limité par les plans normaux aux tangentes en deux points **O** et **O'** qui démarquent l'emprise du voussoir sur le chemin de la voûte. Le profil est dessiné dans une esquisse construite à partir des points **O**, centre de l'arc du berceau, du point **A**, libre de se déplacer au long de cet arc, et des paramètres précédemment présentés tels que l'épaisseur intrados-extrados. La capacité du point **A** à se déplacer au long de l'arc est la seule liberté accordée à l'esquisse : ainsi sous-contrainte, la pièce peut varier une fois convertie en famille. Les points **O** et **A** et les paramètres sont déclarés pilotes. Des esquisses et paramètres semblables sont recréés dans l'assemblage en leur attribuant une valeur qui ne correspond pas forcément à celle de la pièce de base. À l'inclusion de la famille, les opérations sont rejouées en fonction de ces nouvelles valeurs, ainsi est modélisé le voussoir non standard d'une infinité de vis.

4.4 Opérations géométriques et représentations des étapes de taille

Outre la forme finale du voussoir, des étapes de tailles sont modélisées ; elles sont mises en plan pour fournir par exemple le tracé et les gabarits d'une taille manuelle ; *in fine*, la première étape constitue également le bloc englobant dont les dimensions sont à renseigner dans une nomenclature de blocs minimaux à commander en carrière pour une vis donnée. Dans une maquette BIM, un même objet peut avoir plusieurs représentations. Ainsi dans la pièce voussoir à l'origine de la famille, dans la chronologie des opérations géométriques, la forme courante est dupliquée dans une nouvelle représentation à chaque fois qu'il est nécessaire d'indiquer une étape. Pour formaliser numériquement les actions effectuées par le tailleur de pierre, des limitations sont opérées sur le bloc à partir de surfaces qui indiquent les portions de pierre enlevées ; ainsi, pour que le procédé fonctionne, il faut que ces surfaces auxiliaires dépendent tout autant que la forme principale des éléments géométriques et des paramètres déclarés comme pilotes afin de varier correctement pour chaque occurrence incluse dans l'assemblage. Ces étapes de taille sont donc bien embarquées paramétriquement dans la famille et constitutives de l'*objet*.

4.5 Sérialisation et pièce en place dans un assemblage

À partir de la famille, chaque occurrence peut être incluse manuellement dans l’assemblage en définissant à l’avance dans l’assemblage une série de points à partir des lesquels renseigner les pilotes géométriques de l’occurrence. À ce stade, cette méthode pourrait perdre en « paramétrisme » si un changement du nombre de voussoirs sur une assise obligeait d’effectuer de nouvelles inclusions manuelles. Pour y pallier, une sérialisation est créée selon un motif de répétition circulaire paramétré sur le nombre de voussoirs par assise, positionné au centre de l’arc du berceau ; ce procédé duplique une inclusion en redirigeant les références prises pour pilotes de destination à partir du motif de répétition. Il crée à cette occasion une pièce en place, à savoir une pièce qui n’a d’existence qu’à partir d’opérations effectuées directement dans l’assemblage, par opposition à des pièces modélisées en amont dans une approche d’assemblage traditionnelle. Il faut noter qu’à ce stade, un voussoir sur deux devrait être encore décalé d’une moitié au long de l’hélice pour rompre la continuité des joints ; cet aspect n’est pas pris en car il n’impacte pas les documents à extraire, mises en plan des étapes de taille et nomenclature des blocs englobants pour chaque voussoir d’une assise. De la même manière, pour réaliser la vis entière, cette assise est simplement répétée au long de l’hélice, n’appelant pas de paramètre particulier et ne créant pas d’occurrence de voussoir différente. On ne s’occupe en effet, ici, que d’un « arc » de la vis contenant tous les voussoirs différents qui n’ont alors plus qu’à être répétés, à l’exclusion des voussoirs particuliers en début et en fin de vis.

4.6 Nomenclatures et mises en plan en rafale

Les étapes de tailles étant intégrées paramétriquement à la famille, chaque occurrence de voussoir placée dans l’assemblage a généré automatiquement à son inclusion les représentations de chacune de ses étapes de taille. La nomenclature est extraite de l’assemblage, avec un intérêt particulier pour le volume des blocs englobants correspondant aux volumes minimums à commander en carrière. Le procédé de mise en plan en rafale génère automatiquement des dessins pour chaque occurrence de voussoir à partir d’une mise en plan servant de modèle, où il est possible d’intégrer chaque représentation de l’objet pour illustrer un scénario de taille comme le montre la Figure 9.

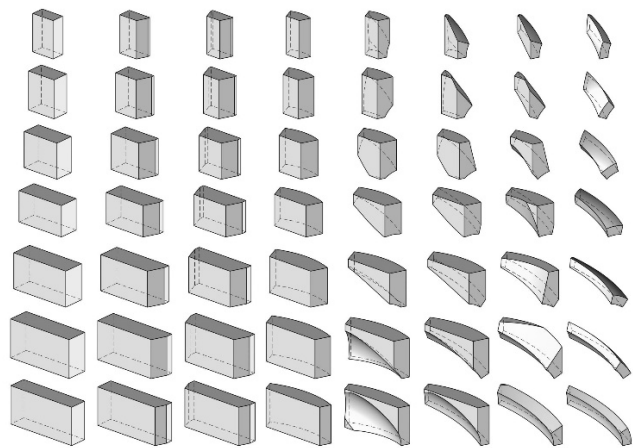


Figure 9. Mise en plan en rafale des étapes de taille de chaque occurrence générée automatiquement

5 Conclusion

Le BIM facilite la résolution des principaux défis posés par la stéréotomie : il permet une modélisation exacte de volumes particulièrement complexes géométriquement, et associe un traitement organisé et automatisé de données nombreuses au vu des multiples pièces constitutives d'un assemblage en pierre. Au travers de la vis Saint-Gilles, l'article démontre l'utilité d'interpréter des traités de la Renaissance sur des outils numériques contemporains, à la fois pour produire une connaissance sur un patrimoine bâti et pour appliquer des techniques numériques récentes à un procédé de construction traditionnel dont la démarche géométrique est toujours d'actualité. La valeur intrinsèquement variationnelle de la stéréotomie invite à la réinterpréter à l'aide d'outils paramétriques, tandis que le lien étroit qu'elle instaure entre conception et fabrication engage à la transposer dans une chaîne associative de documents de type CFAO. Ainsi la méthode proposée intègre paramétriquement dans une maquette BIM, à partir d'une famille variable, les étapes de taille des voussoirs constituant une assise de l'assemblage. Elle permet de produire en série la documentation régissant le procédé de fabrication et la nomenclature des blocs englobants de pierre, en vue d'une commande en carrière, pour diverses configurations de l'assemblage. Cette approche devra être vérifiée sur des assemblages stéréotomiques plus complexes, croisant par exemple divers types de voûtes qui nécessiteront plusieurs familles et sur-assemblages. Elle devra aussi être complétée par des usinages sur CNC pour vérifier sa compatibilité avec des méthodes contemporaines de fabrication en pierre de taille, qui sont de plus en plus mécanisées. À ce titre, il sera également nécessaire de réinterpréter les étapes de tailles en fonction des potentiels et contraintes de ces outils. En effet de nouvelles conditions techniques renouvellent les contraintes, les processus et les points d'attention, impactant par exemple le positionnement d'un bloc englobant par rapport à son voussoir fini.

Bibliographie :

- [1] G. Perraudin (2013), *Construire en pierre de taille aujourd'hui: musée des vins et jardin ampélographique, Patrimoine, Haute-Corse* (Les Presses du réel)
- [2] C. Oliver (2024), Handcrafting Digital Transition – Conférence Superonda, EPFL
- [3] A. Picon (2010), *Culture numérique et architecture: une introduction* (Birkhäuser, Bâle)
- [4] M. Carpo (2017), *The second digital turn: design beyond intelligence* (The MIT Press, Cambridge, MA)
- [5] M. Carpo (2023), *Beyond Digital. Design and Automation at the End of Modernity* (The MIT Press)
- [6] F. Migayrou (2003), *Architectures non standard* (Éditions du Centre Pompidou, Paris)
- [7] F. Plihon (2016), *Architectures Numériques et Résurgence Baroque : bernard Cache, Greg Lynn et le Pli de Deleuze*, Thèse de doctorat, Lille 3
- [8] B. Cache and P. Beauce (2003), *Vers un mode de production non-standard*
- [9] G. Fallacara (2007), *Towards a stereotomic design : Notions of stereotomy, digital stereotomy and topological transformations: reasoning about the construction of the form* (Aracne, Roma)
- [10] G. Fallacara and M. Barberio (2018), *Nexus Netw. J.* **20** (519)
- [11] M. Brocato and L. Mondardini (2010), in edited by C. Ceccato, L. Hesselgren, M. Pauly, H. Pottmann, and J. Wallner (Springer, Vienna), pp. 149–162
- [12] M. Rippmann and P. Block (2011), in *Proceedings of the IABSE-IASS symposium 2011* (London)
- [13] E. Akleman, V. R. Krishnamurthy, C.-A. Fu, S. G. Subramanian, M. Ebert, M. Eng, C. Starrett and H. Panchal (2020), *Comput. Graph.* **89** (156)
- [14] I. Miodragovic and T. Kotnik (2016), *Shape Form Geom. Appl.* **2** (391)
- [15] E. Baillieu, L. Leroux and D. Chaoui-Derieux (2024), *J. Cult. Herit.* **65** (68)
- [16] R. Bechmann, *Les racines des cathédrales : l'architecture gothique, expression des conditions du milieu* (Payot & Rivages, Paris, 1981)

- [17] N. Petkova (2022), *Dimens. J. Archit. Knowl.* **2** (107)
- [18] P. Potié, *Philibert de L'Orme : figures de la pensée constructive* (Éditions Parenthèses, Marseilles, 1996)
- [19] J.-M. Pérouse de Montclos (1985), in *Escalier Dans Archit. Renaiss.* (Picard, Paris), pp. 83–89
- [20] P. Delorme (1567), *Le premier tome de l'architecture* (Federic Morel, Paris)
- [21] M. Jousse (1642), *Le Secret d'architecture découvrant fidèlement les traits géométriques, coupes, et déroboemens nécessaires dans les bastiments* (George Griveau, La Flèche)
- [22] F. Derand (1643), *L'architecture des voûtes, ou l'art des traits et coupe des voûtes* (Sebastien Cramoisy, Paris)
- [23] J.-B. de La Rue (1728), *Traité de la coupe des pierres, où par une méthode facile et abrégée, l'on peut aisément se perfectionner en cette science* (Imprimerie royale, Paris)
- [24] A. Frézier (1754), *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois, pour la construction des voûtes et autres parties des bâtiments civils & militaires, ou traité de stéréotomie à l'usage de l'architecture* (Charles-Antoine Jombert, Paris)
- [25] J. Rondelet (1830), *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir. Tome 2*, A. Rondelet fils (Paris)
- [26] J. Calvo-López (2020), in *Ster. Stone Constr. Geom. West. Eur. 1200-1900* (Birkhäuser, Cartagena), pp. 540–551
- [27] G. Fallacara (2003), Il paradigma stereotomico nell'arte del costruire. Dalla natura sincretica della modellazione digitale alla progettazione/costruzione di elementi architettonici in pietra da taglio, Thèse de doctorat, Politecnico di Bari
- [28] L. Tamboréro (2006), in *Proceedings of the second international congress on construction history* (Cambridge), pp. 3025–3040
- [29] A. Sanjurjo Álvarez (2015), La escalera de caracol en los tratados de cantería españoles de la Edad Moderna y su presencia en el Patrimonio Construido hispánico: estudio geométrico y constructivo, Thèse de doctorat, E.T.S. Arquitectura (UPM)
- [30] J. Calvo López, M. Á. Alonso-Rodríguez and A. López Mozo (2004), Imafronte 7
- [31] M. Mercedes Bares (2007), *Lex. Storie E Archit. Sicil.* **15**
- [32] Entretiens avec Gilbert Margueritte, tailleur de pierre (2022)
- [33] J. C. Palacio González (1987), *Inf. Constr.* **39** (73)
- [34] J. Sakarovich (1998), *Épures d'architecture. De la coupe des pierres à la géométrie descriptive, XVI^e-XIX^e siècles* (Birkhäuser Verlag, Basel)
- [35] A. W. Ismail and P. Marin (2022), in *eCAADe 2022: Co-creating the Future - Inclusion in and through Design* (Ghent, Belgium), pp. 537–546