

Transfert de procédés industriels BIM & CFAO et interopérabilité ouverte pour la stéréotomie : application à l'escalier de Fontainebleau

Raphaël Vouilloz¹, Philippe Marin¹

¹ Univ. Grenoble-Alpes, ENSAG, MHA, 38000 Grenoble, France ; vouilloz.r@grenoble.archi.fr ; philippe.marin@grenoble.archi.fr

RESUME Les applications actuelles de la stéréotomie incluent la restauration du patrimoine et la construction neuve, en vertu des qualités environnementales de la pierre de taille. Une transposition numérique est souhaitable, compte tenu d'enjeux liés à la complexité et la productivité. Pour diffuser de nouvelles méthodes à grande échelle, l'accessibilité et l'interopérabilité des outils sont à considérer. Cet article propose une approche fondée 1) sur le transfert de procédés BIM (Building Information Modeling) et CFAO (Conception-Fabrication Assistée par Ordinateur) issus de disciplines plus avancées ; 2) sur des solutions open source et de formats standards. Un état de l'art contextualise la réinterprétation contemporaine de la stéréotomie opérée par le monde académique et professionnel. Puis le cas d'étude est présenté, à savoir le voûtement de l'escalier en fer à cheval du château de Fontainebleau. Enfin, une série d'expérimentations est développée en deux parties, orientées sur le continuum conception-fabrication puis sur l'interopérabilité et l'open source. Ces recherches participent aux réflexions actuelles sur l'adoption des outils numériques dans le secteur de la pierre de taille.

Mots-clefs stéréotomie, design paramétrique, BIM, CFAO, interopérabilité

I. INTRODUCTION

La stéréotomie est l'art de la coupe et de l'assemblage des pierres, pour former de voûtes, des trompes ou des escaliers. C'est une discipline principalement historique, mais qui revêt un intérêt actuel pour les métiers de l'AEC (*Architecture, Engineering and Construction*). Elle est à la fois utilisée dans la restauration du patrimoine, et réinterprétée de manière contemporaine. La pierre de taille est en effet de plus en plus appréciée dans la construction neuve, en vertu des qualités environnementales de matériau. Au cours des dernières années, cet art a évolué en intégrant des technologies numériques, que ce soit de la part du milieu académique ou professionnel. Cette transition est souhaitable notamment en ce qui a trait à la complexité des projets et à la productivité. Il s'agit en effet de baisser les coûts de la construction neuve en pierre de taille, afin de concurrencer les matériaux contemporains moins écologiques, tel que le béton armé.

Notre article aborde cette réactualisation numérique de la stéréotomie à partir du transfert de procédés issus de disciplines connexes plus avancées en matière d'adoption d'outils numériques. D'abord, il s'agit des méthodes dites BIM (*Building Information Modeling*) et CFAO (*Conception-Fabrication Assistée par Ordinateur*). Ces méthodes, dérivées de procédés élaborés par l'industrie,

instaurent un continuum numérique entre la modélisation de l'objet, la production automatisée d'informations et de documentation, et l'usinage sur machines. Dans cette optique, on peut considérer que la stéréotomie s'apparente au domaine industriel, puisqu'elle consiste en l'assemblage de pièces complexes, tant sur le plan de la géométrie que de la gestion de la donnée. Cette analogie nous a conduit à une première série d'expérimentations. Parallèlement, les spécificités de l'organisation du travail dans l'AEC, en particulier la répartition interdisciplinaire et multipolaire des compétences, invitent à porter une attention particulière sur la notion d'interopérabilité et d'ouverture des outils et de la donnée. Ceci fait l'objet d'une seconde série d'expérimentations, qui explore des standards et outils collaboratifs.

Nos travaux sont issus d'une recherche doctorale portant sur l'escalier en fer à cheval du château de Fontainebleau, un ouvrage remarquable de la stéréotomie. La complexité de son voûtement offre un terrain idéal pour mettre à l'épreuve les méthodes numériques explorées. L'article est structuré comme suit : d'abord, un état de l'art de la transposition de la stéréotomie aux outils numériques est présenté. Ensuite, le cas d'étude de l'escalier de Fontainebleau est introduit. Puis les expérimentations numériques sont décrites, en commençant par le BIM et la CFAO, deuxièmement par l'interopérabilité, l'open source et les standards ouverts. Enfin, une conclusion est proposée.

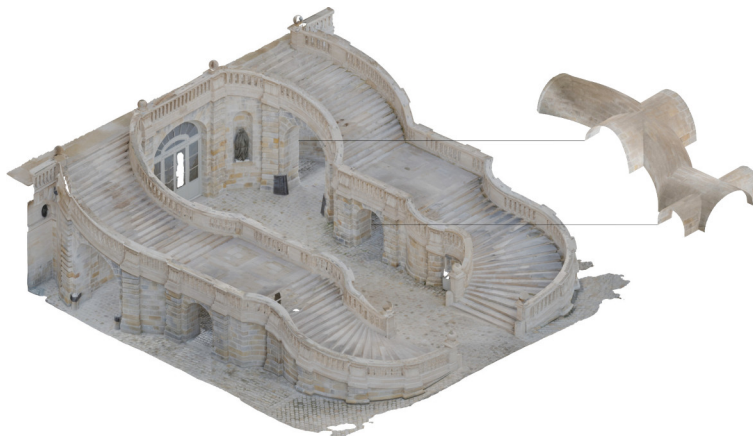


Figure 1. Relevé numérique de l'escalier et mise en évidence du voûtement étudié.

II. ÉTAT DE L'ART

La réinterprétation de la stéréotomie au travers des outils numériques a fait l'objet de projets académiques et de cas d'application pratique dans le milieu professionnel, parfois en collaboration. Différentes unités de recherche se sont ainsi spécialisées dans cette tâche. On compte parmi celles-ci le *New Fundamentals Research Group (Polytecnico de Bari)*, le *Block Research Group (ETH Zurich)*, le laboratoire Géométrie Structure Architecture (Ensa Paris Malaquais) et le laboratoire de Mécanique et Génie Civil (Université de Montpellier). Ces travaux ont abordé les notions de modélisation paramétrique, de fabrication robotisée, ou encore le calcul structurel (Fallacara, 2003; Fernando, 2019; Rippmann, 2016). Cet élan commun a donné lieu à un numéro spécial de la revue *Nexus Network Journal* intitulé *Stereotomy 2.0* (Fallacara & Barberio, 2018). Parallèlement, le milieu professionnel s'est appuyé sur des méthodes numériques innovantes. Dans le domaine du patrimoine, la restauration post-incendie de Notre-Dame a été un terrain

d'expérimentations particulièrement productif et mobilisateur, soutenu par la recherche scientifique (De Luca et al., 2022). Les questions du relevé numérique et de l'interdisciplinarité y revêtent une grande importance. Dans le domaine de la construction contemporaine en pierre massive, le projet du chai de la Maison Delas (Carl Fredrik Svenstedt Architects – Stono - Grain d'Orge) a engagé des compétences à la fois en modélisation paramétrique, simulation structurelle et fabrication robotisée (Bagnéris & Cherblanc, 2023; Chastel, 2023). Le projet d'immeuble de logements de la Coulouvrenière à Genève (Atelier Archiplein - B+S Ingénieurs) s'est, quant à lui, appuyé sur le BIM pour l'ingénierie et la planification (Vouilloz & Marin, 2024a).

L'adoption de ces méthodes numériques par un plus grand nombre est nécessaire, compte tenu des enjeux (patrimoine, écologie). Nous identifions deux obstacles à cette instrumentation numérique et organisons nos expérimentations en deux volets :

- La complexité des interfaces paramétriques de conception-fabrication et le coût des machines-outils, en particulier des robots, constituent des obstacles d'ordre humain et financier. Nous proposons de transposer ou améliorer des procédés déjà existants dans le milieu professionnel, en particulier la notion de continuum numérique mobilisable par le BIM et la CFAO.
- L'échange de géométries et données entre de multiples logiciels informatiques utilisés par une variété de disciplines constitue un second frein. Nous examinons des procédés d'interopérabilité, des logiciels open source et des standards ouverts.

III. CAS D'ÉTUDE : L'ESCALIER EN FER-À-CHEVAL DE FONTAINEBLEAU

Notre recherche prend pour cas d'étude l'escalier en fer-à-cheval du château de Fontainebleau. On ne sait pas avec certitude qui l'a conçu, les historiens l'attribuant à Jacques Lemercier ou Jean Androuet du Cerceau (Gady, 2005; Pérouse de Montclos, 1998). Il a été édifié en 1634 en remplacement d'un précédent escalier de Philibert Delorme. Ses deux volées monumentales mettent en scène l'arrivée des visiteurs depuis la cour du cheval blanc. En matière de stéréotomie, notre intérêt se concentre sur son voûtement, qui supporte l'ascension des marches en même temps qu'il abrite une arrivée en carrosse. Nous l'avons étudié à partir de plusieurs méthodes : un relevé numérique (Figure 1), un examen des traités, une modélisation paramétrique et une expérimentation de fabrication avec des spécialistes de la taille de la pierre, Gilbert Margueritte et Marie-Pierre Zufferey. Nous interprétons cet assemblage comme le croisement d'un berceau hélicoïdal, ou vis Saint-Gilles, avec un arc rampant (Figure 2). Dans sa configuration « standard », cet assemblage est documenté dans plusieurs traités d'époque (Derand, De la Rue, Frézier, Adhémar) et reconnu comme particulièrement complexe -c'est l'ultime chapitre du traité de Derand-. Par ailleurs, dans sa version bellifontaine, trois variantes ont été apportées au tracé de cette voûte. Une telle mise en variation d'un modèle traditionnel témoigne d'une méthode d'invention caractéristique de l'époque, selon une théorie de Philippe Potié dans son ouvrage sur Philibert Delorme (Potié, 1996).



Figure 2. Voûtement étudié, au croisement d'un berceau hélicoïdal avec un arc rampant.

Les trois variations de l'assemblage traditionnel vers celui de Fontainebleau sont les suivantes (**Figure 3**) :

- Les projections des lignes de lit de la vis Saint-Gilles ne sont plus des arcs de cercle parallèles et concentriques, mais de même rayon et décalés.
- Les plans d'élévation des arcs inférieurs et supérieurs de la vis Saint-Gilles ne tendent plus vers le centre des cercles, mais sont positionnés en biais, raccordant d'autres voûtes.
- Ces mêmes arcs sont des arcs d'ellipses (probablement approximés en ovales) et non plus des arcs de cercle.

Nous pensons qu'il y a deux raisons pour expliquer ce geste architectural. D'abord, la voûte rampante s'en trouve simplifiée : dans les traités, elle prend la forme d'une espèce de cône dont le sommet est un segment droit vertical au centre de la vis ; la variation rend ces lignes parallèles et permet de dessiner la voûte avec un profil constant. Deuxièmement, cette configuration implique une ascension droite, perpendiculaire à la façade. C'est en effet ainsi que sont disposées les marches, contrairement à celles d'une vis Saint-Gilles classique, dont l'ascension dans une tour est effectuée de manière circulaire.

Ce voûtement constitue un terrain de recherche idéal pour expérimenter des méthodes numériques modernes, de par sa complexité géométrique et sa conception proto-paramétrique par variations.

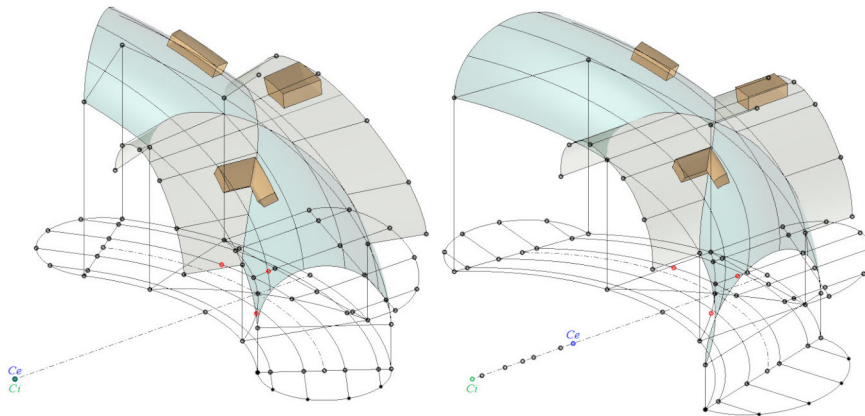


Figure 3. Variations de la voûte des traités (à gauche) vers la voûte de Fontainebleau (à droite).

IV. EXPÉRIMENTATIONS : TRANSFERT DE PROCÉDÉS INDUSTRIELS BIM & CFAO

Les interfaces paramétriques utilisées par la recherche académique opèrent le plus souvent par programmation visuelle, une méthode à haut niveau d'abstraction qui peut être difficile à maîtriser pour un large public. En outre, alors que la littérature scientifique investit le domaine de la fabrication robotique, il subsiste un obstacle financier à sa diffusion. Ainsi, la stratégie de cette première série d'expérimentation est d'améliorer un écosystème numérique déjà existant dans le contexte de la taille de la pierre en France. Il relie le logiciel de modélisation TopSolid aux machines à commande numérique pour usiner la pierre Thibaut, deux entreprises françaises dont le caractère local explique l'implantation. Actuellement, les activités engagées sont de l'ordre de la fabrication d'éléments mobiliers ou de voirie, de monuments funéraires ou des préparations de blocs pour la restauration du patrimoine. Le recours aux capacités paramétriques du logiciel reste cependant peu exploité. Pour augmenter l'attractivité économique de la pierre de taille, notre stratégie est d'optimiser ce continuum de conception-fabrication, à partir d'échanges avec ce secteur professionnel : développement, fabrication des machines, et taille de la pierre. Dans cette perspective, nous ciblons les processus qui peuvent être automatisés, en examinant l'usage de l'outil dans l'industrie, mais également dans les domaines du bois et de la métallerie.

A. Approche géométrique, dessin paramétrique et relation pièces-familles-assemblage

Plusieurs caractéristiques techniques de cet outil industriel sont profitables à la stéréotomie. D'abord, il se fonde sur de la modélisation exacte de type solide. Cette approche est particulièrement propice aux éléments constitutifs d'assemblages en pierre, appelés les voussoirs, car leur forme obéit à une suite d'opérations géométriques. En outre, les fonctions de modélisation conservent les formes fermées, une condition nécessaire à l'extraction automatique de données ou de documentations caractéristiques du BIM. Par ailleurs, la modélisation paramétrique s'appuie sur des esquisses. Semblable à la pratique traditionnelle, cette approche à bas niveau d'abstraction est centrée sur le dessin, ce qui la rend accessible à un large éventail de professionnels de l'AEC. Enfin, l'outil est structuré selon une logique propre à l'industrie fondée sur la notion de pièce et d'assemblage ; la mise en variation paramétrique des éléments est opérée depuis un système de familles courant dans le BIM.

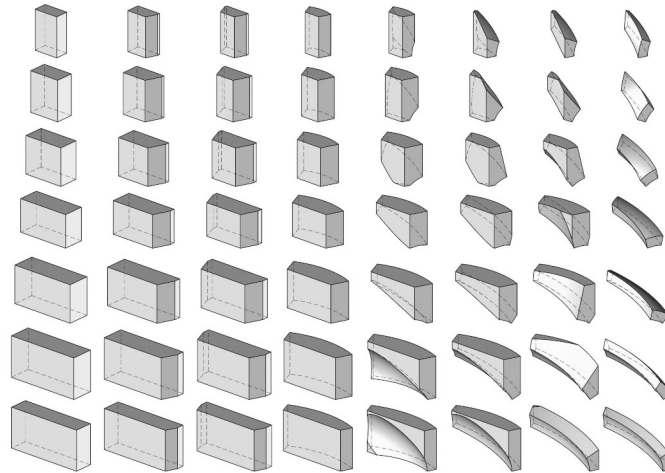


Figure 4. Automatisation d'étapes de tailles à partir d'une famille paramétrique, pour la vis Saint-Gilles.

B. Chaîne associative de documents et continuum numérique de la conception à la fabrication

Nous explorons en particulier la notion de continuum numérique sous-jacente au BIM et la CFAO. Le logiciel intègre un PDM (*Product Lifecycle Management*), qui organise le suivi des pièces de la conception à la fabrication au sein d'une chaîne associative de documents, avec une gestion des versions et de la collaboration. La modélisation BIM d'une vis Saint-Gilles a fait l'objet d'une précédente communication ; celle-ci présentait la mise en place d'une famille non standard adaptable à toutes les occurrences de voussoirs de l'assemblage. Ces variations intégraient l'extraction automatique d'étapes de tailles pour mettre en évidence l'associativité des documents (Figure 4) (Vouilloz & Marin, 2024b). Ces travaux ont été poursuivis par la modélisation du voûtement de Fontainebleau, un assemblage plus complexe qui engage des enjeux de sérialisation sur des motifs de répétition à plusieurs dimensions. Cette approche tire parti du module *Rhino.Inside.TopSolid*, détaillé en section V.C. Les notions liées à la fabrication ont également été incorporées, par des préparations et simulations d'usinage d'un voussoir d'arête, sur une machine à commande numérique classique. L'usinage opère en trois temps : 1) une ébauche à la scie 2) une approche des surfaces réglées par strates horizontales à l'aide d'un disque 3) une finition à la fraise (Figure 5). L'objectif est d'automatiser le procédé pour l'ensemble des voussoirs à partir de la famille paramétrique.

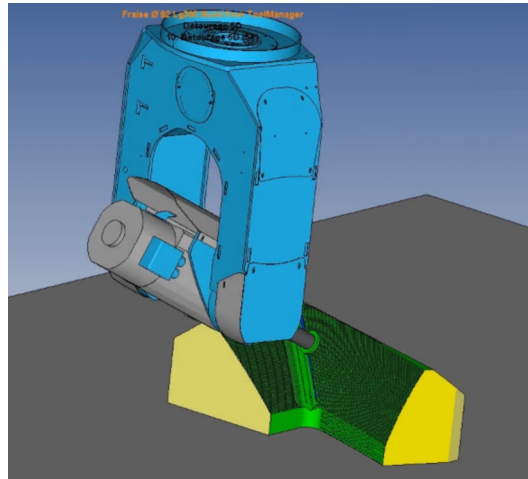


Figure 5. Simulation d'usinage d'un voussoir d'arête de Fontainebleau (avec A. Calas, Thibaut).

V. EXPÉRIMENTATIONS : INTEROPÉRABILITÉ OUVERTE

Le secteur de l'AEC se caractérise par une grande diversité d'acteurs travaillant sur un même projet. La division des tâches entre entités autonomes représente un défi particulier pour l'instrumentation numérique ; il faut assurer l'interopérabilité des systèmes afin que les différentes parties puissent collaborer efficacement, tout en manipulant des informations très complexes, notamment sur le plan géométrique. Nos expérimentations couvrent plusieurs scénarios de collaboration en utilisant trois outils différents : le standard ouvert du BIM *Industry Foundation Classes* (IFC), la plateforme collaborative ouverte *Speckle* et le module d'interopérabilité en flux direct *Rhino.Inside.TopSolid*.

A. Le standard IFC comme format d'édition natif

L'IFC est le standard ouvert du BIM. Traditionnellement, son utilisation est limitée à un format d'échange ou d'archivage exporté depuis des environnements propriétaires. Dépendant des capacités de conversion de ces outils, son utilisation peut être perçue comme difficile. De plus, son adaptation aux spécificités de la pierre n'est pas évidente, tant en ce qui concerne la géométrie que les données. Nous abordons l'IFC sous un angle particulier, celui de l'IFC natif. Des projets open source, tels que *Bonsai* (un plugiciel pour *Blender*), *FreeCAD* et *That Open Engine* (une bibliothèque web), ont revalorisé le standard IFC en le considérant comme un format natif d'édition. Menée en collaboration avec le *Carleton Immersive Media Studio* (CIMS), cette expérimentation a consisté à combiner relevé numérique et BIM. La première étape a été de transformer un modèle photogrammétrique en IFC dans *Bonsai*. La seconde étape a été de développer une visionneuse web qui superpose cet IFC avec le relevé numérique au format 3D Tiles, à partir des bibliothèques *That Open Engine* et *3DTilesRenderer*, elles-mêmes appuyées sur *Three.js*. Cette méthode permet de bénéficier à la fois d'une représentation photoréaliste et d'une interaction avec les informations (Figure 6). Nous envisageons des applications dans la diffusion d'études de diagnostic ou de recherches en archéologie du bâti.

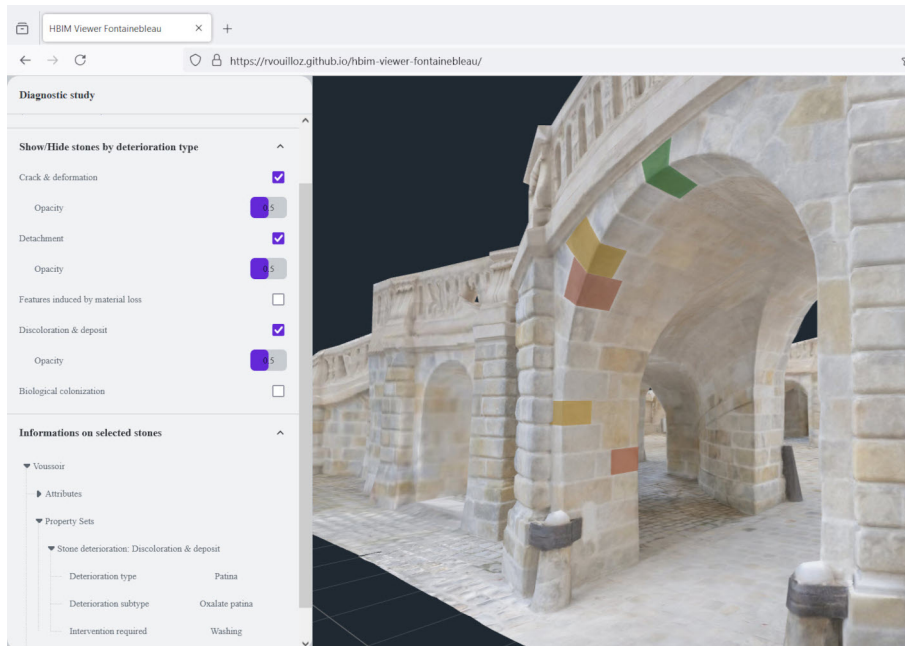


Figure 6. Visionneuse web HBIM superposant 3D Tiles et IFC (avec le CIMS).

B. Speckle, une plateforme distribuée ouverte pour la collaboration

Le deuxième outil d'interopérabilité expérimenté est Speckle, une plateforme collaborative open source pour l'AEC (Ismail & Marin, 2022b). Elle constitue une alternative aux échanges traditionnels de fichiers basés sur des imports et exports de formats standards, tels que le STEP ou l'IFC. Speckle reproduit la donnée issue d'un premier logiciel de manière native dans un second logiciel, sans conformer la donnée à un standard intermédiaire. Elle dispose en outre d'un système de versions et de commentaires au travers d'une visionneuse web. Nous travaillons sur deux cas d'utilisation. Le premier vise à fluidifier les échanges de maquettes numériques entre concepteurs, qu'ils soient architectes ou tailleurs de pierre, modélisant dans un premier environnement logiciel tel que TopSolid, avec les ingénieurs en structure qui opèrent dans un second environnement logiciel, tel que LMGC90. Ce scénario a été élaboré à partir d'échanges avec le laboratoire LMGC et le bureau d'étude Stono. Deuxièmement, nous utilisons Speckle en tant que librairie web pour développer une visionneuse web particulière, afin de diffuser des constructions géométriques liés à l'histoire de l'architecture. Dans cette optique, le caractère ouvert de Speckle permet de choisir les données à embarquer lors de l'extraction du logiciel de création et de les exploiter librement dans un environnement tiers qu'est la visionneuse web : par exemple, des ensembles d'objets, des nominations ou des repères dont l'extraction à partir de formats standards n'est pas garantie (Figure 7).

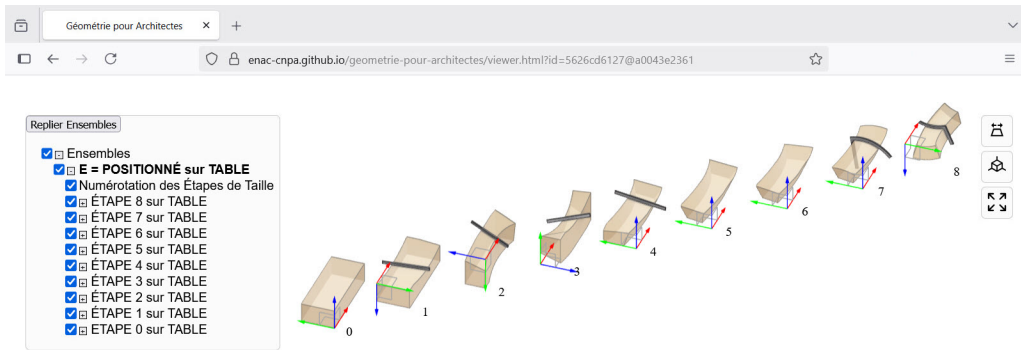


Figure 7. Visionneuse web 3D pour le partage de constructions géométriques.

C. Rhino.Inside.TopSolid, un flux direct entre logiciels

Enfin, nous expérimentons le module *Rhino.Inside.TopSolid* (Ismail & Marin, 2022a). Ce dernier permet la combinaison simultanée des logiciels *Rhinoceros 3D* et *TopSolid* sur un même ordinateur. Les opérations sont synchronisées en direct, de sorte que les capacités des deux environnements sont multipliées. Dans notre cas d'étude, l'accès à *Grasshopper* via *Rhinoceros 3D* offre des fonctions paramétriques complémentaires pour automatiser des procédés de *TopSolid*. En particulier, *Grasshopper* offre une gestion de listes à plusieurs niveaux ; cela permet la répétition d'éléments selon des motifs complexes à plusieurs dimensions, une caractéristique courante de la stéréotomie pour éviter la continuité des joints. Ainsi sur *Grasshopper*, nous automatisons l'inclusion des voussoirs dans l'assemblage à partir d'une liste de points, une opération autrement effectuée à la main ; cela déclenche sur *TopSolid* la production automatique des documents associés (Figure 8). Dans un deuxième temps, nous utilisons le même outil pour automatiser les opérations liées à l'usinage. Cette interopérabilité donne également accès aux plugins développés dans *Grasshopper*, par exemple pour le calcul de structure.

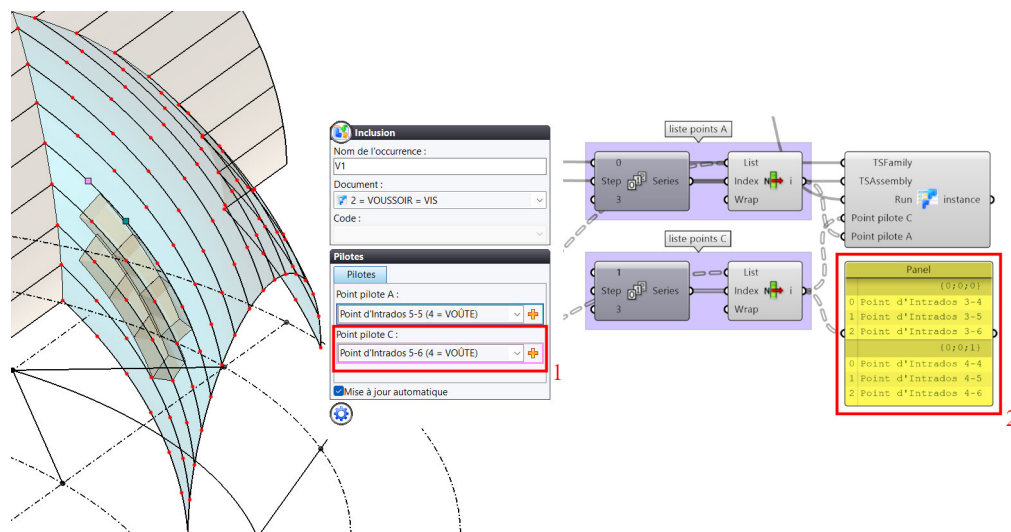


Figure 8. Inclusion de pièces (1) automatisée par sérialisation des points pilotes (2) (avec A. Ismail).

VI. CONCLUSION

La restauration du patrimoine et la construction contemporaine en pierre de taille peuvent tirer profit d'une instrumentation numérique de la stéréotomie. Pour que ces méthodes soient largement prises en main par le secteur, l'accessibilité et l'interopérabilité sont à renforcer. L'approche proposée consiste à améliorer un contexte logiciel existant en y intégrant des méthodes BIM et CFAO issues de disciplines connexes et en explorant des solutions interopérables et ouvertes. Un cas d'étude a été présenté à partir de l'escalier en fer à cheval du château de Fontainebleau. Une série d'expérimentations numériques a été présentée avec un détail des caractéristiques techniques et des cas d'application envisageables. Ces propositions serviront de base à des travaux futurs sur le BIM, la CFAO et l'interopérabilité dans le domaine de la pierre de taille.

REFERENCES

- Bagnéris, M., & Cherblanc, F. (2023). *Murs en pierre précontraints*. Journées Nationales de la Maçonnerie, Ecole Centrale de Lyon.
- Chastel, O. (2023). *Des chantiers remarquables*. 15ème journée technique du CTMNC, Paris.
- De Luca, L., Abergel, V., Guillem, A., Malavergne, O., Manuel, A., Néroulidis, A., Roussel, R., Rousset, M., & Tournon, S. (2022, October). *L'écosystème numérique n-dame pour l'analyse et la mémorisation multi-dimensionnelle du chantier scientifique Notre-Dame-de-Paris*. ENSA and Équipe Aria (UMR MAP) and Association de Recherche sur la Conception Architecturale Numérique. <https://hal.science/hal-03826931>
- Fallacara, G. (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.
- Fallacara, G., & Barberio, M. (2018). Stereotomy 2.0: The Rebirth of a Discipline that Never Died. *Nexus Network Journal*, 20(3), 509–514. <https://doi.org/10.1007/s00004-018-0408-6>
- Fernando, S. E. (2019). *The Machine and the Arch: Explorative Intersections in Stereotomic Practice, Structural Design and Robotic Crafting of Dry Stone Interlocking Joint Structures* [Thèse de doctorat, University of Sydney]. <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/21082>
- Gady, A. (2005). *Jacques Lemercier: Architecte et ingénieur du Roi*. Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Ismail, A. W., & Marin, P. (2022a). *Direct Interoperability between Industrial Engineering and AEC: Technical and Geometric Challenges*. 537–546. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.1.537>
- Ismail, A. W., & Marin, P. (2022b). Faciliter l'interopérabilité à l'aide de flux de données directs, expérimentation d'une plateforme distribuée ouverte. *SHS Web of Conferences*, 147, 01003. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202214701003>
- Pérouse de Montclos, J.-M. (with Fessy, G.). (1998). *Le château de Fontainebleau*. Scala.
- Potié, P. (1996). *Philibert de L'Orme: Figures de la pensée constructive*. Editions Parenthèses.

Rippmann, M. (2016). *Funicular Shell Design: Geometric approaches to form finding and fabrication of discrete funicular structures* [Thèse de doctorat, ETH Zurich]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010656780>

Vouilloz, R., & Marin, P. (2024a). *Impacts des procédés numériques sur l'architecture en pierre de taille contemporaine. Synthèse d'entretiens*. 36ème Congrès du Comité International de l'Histoire de l'Art, Lyon.

Vouilloz, R., & Marin, P. (2024b). *Modélisation BIM d'une famille variable de voussoir et de ses étapes de taille pour la vis Saint-Gilles*. EduBIM 2024: Données, intelligences et nature de la ville durable, Paris.