

# UNE RECONSTITUTION VIRTUELLE EN TROIS DIMENSIONS DE LA CATHÉDRALE DE STRASBOURG

## Méthodologie informatique appliquée aux restitutions architecturales

Stéphane POTIER\*

La Fondation de l'Œuvre Notre-Dame, dans le cadre de sa politique de restauration et de conservation de la cathédrale de Strasbourg [1], m'a confié la restitution architecturale et archéologique de la cathédrale de Strasbourg (de 1015 à 1439) par le biais d'une modélisation des états antérieurs et actuels à l'aide des technologies 3D et des images de synthèse [2].

Il s'agit d'obtenir une base de données architecturale qui permette de disposer d'un nouveau médium de recherche pour les historiens de l'art et les chercheurs, et qui permette une meilleure compréhension de la cathédrale en vue de la formation des artisans de l'Œuvre Notre-Dame, ou encore pour des communications à l'attention du grand public.

Le but du présent article n'est pas de soumettre à la critique le résultat des restitutions architecturales, qui constituent ici une base de discussion, mais d'exposer la méthodologie employée pour la modélisation de la cathédrale, et la façon dont interagissent outil informatique et processus de restitution archéologique.

### Principes de modélisation numérique

Les stratégies de modélisation présentées ici sont sous-tendues par les implications et les contraintes de la méthodologie appliquée à la formulation d'hypothèses archéologiques. Les modélisations 3D doivent reposer sur un principe de décom-

position architecturale et de recombinaison infographique qui permet d'une part de gérer la masse d'objets architecturaux constitutifs du modèle (plus de 11000 objets uniquement pour le chevet et les transepts de la cathédrale) (fig. 1), d'autre part de rendre ce modèle évolutif pour la formulation d'hypothèses archéologiques de restitution.

### *Décomposition Architecturale* [3]

Pour représenter un objet architectural, il est nécessaire, en premier lieu, d'analyser cet objet et de procéder à sa décomposition en éléments géométriques élémentaires. Il faut ensuite mettre en place une représentation interne, répondant à une logique informatique, des objets géométriques. Cela conduit à introduire dans la mémoire de l'ordinateur des informations structurées, nécessaires à la description d'un modèle géométrique représentant l'objet, dans notre cas une base de données architecturale de la cathédrale de Strasbourg. Cette structuration des objets à modéliser se traduit par une phase de travail sur papier préalable à toute opération sur ordinateur, qui consiste à proposer des arbres hiérarchiques architectoniques concernant toutes les parties du bâtiment (fig. 2).

Dans la logique de décomposition d'un objet architectural en éléments géométriques simples, il faut procéder à la création d'entités hiérarchiques qui définissent le degré d'agrégation spatiale des éléments de la base de données géométriques.

Ces entités doivent s'appuyer sur un vocabulaire architectural strict pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté dans les nominations d'éléments; le glossaire de référence est celui de

(\*) Architecte, Strasbourg.

[1] L'Œuvre Notre-Dame, en tant que structure chargée d'organiser les interventions des corps de métier œuvrant sur le chantier et de collecter les fonds nécessaires pour la poursuite de l'ouvrage, est mentionnée pour la première fois dans un texte de 1246. Son histoire ininterrompue depuis se poursuit aujourd'hui tant par la participation aux travaux de restauration, ainsi que la surveillance et l'entretien du monument, que par la sauvegarde et la transmission du savoir-faire et du fonds documentaire accumulés depuis huit siècles.

[2] L'image de synthèse est produite toute entière par ordinateur, avec une possibilité de transfert du réel (par le placage d'images).

[3] C'est au sein du GAMSAU, laboratoire du Centre national de la Recherche scientifique basé à l'École d'Architecture de Marseille Luminy, qu'a été développée cette méthode de hiérarchisation de base de données architecturales. J'ai pu tester et adapter cette méthode avec succès lors de la réalisation de mon diplôme de Fin d'Études en Architecture portant sur la restitution des Thermes de Constantin en Arles au IV<sup>e</sup> siècle après J.C.

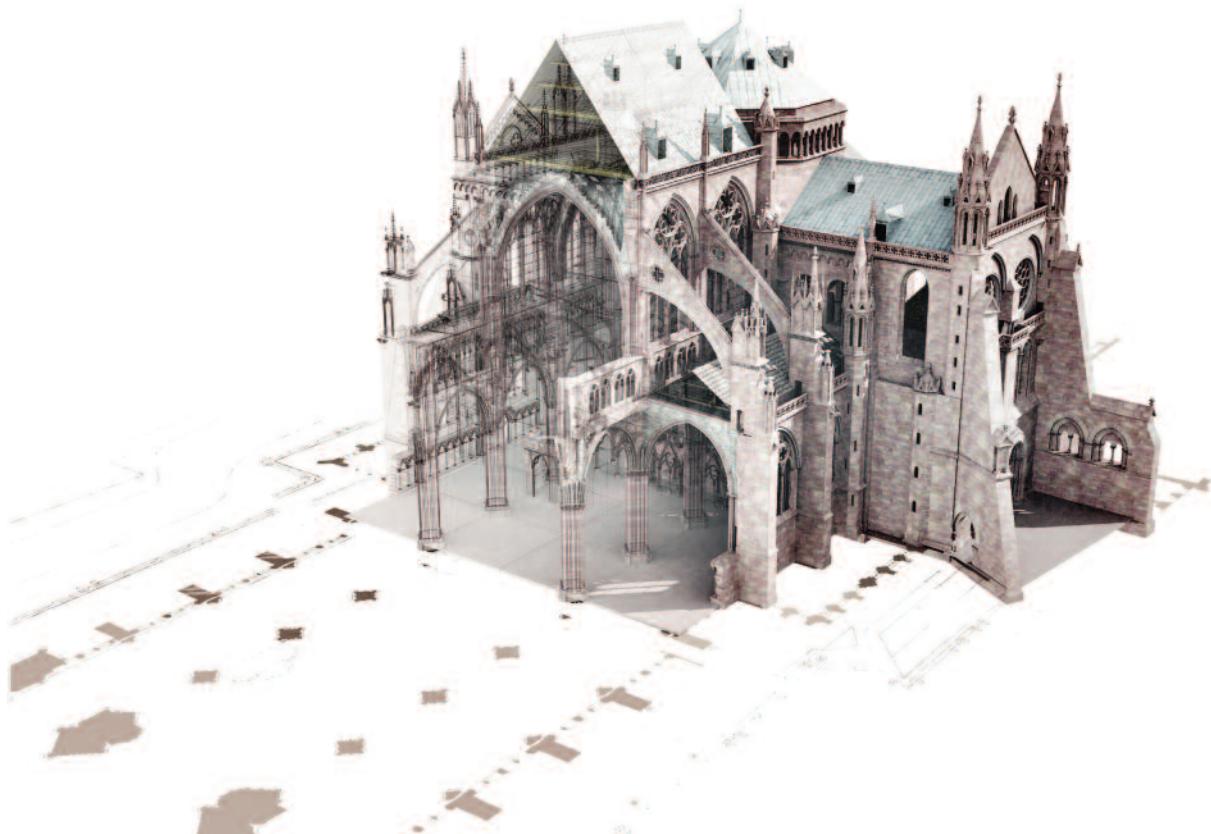


Figure 1. La nef et le transept de la cathédrale de Strasbourg, perspective depuis le Sud-Ouest montrant le modèle texturé et en fil de fer.

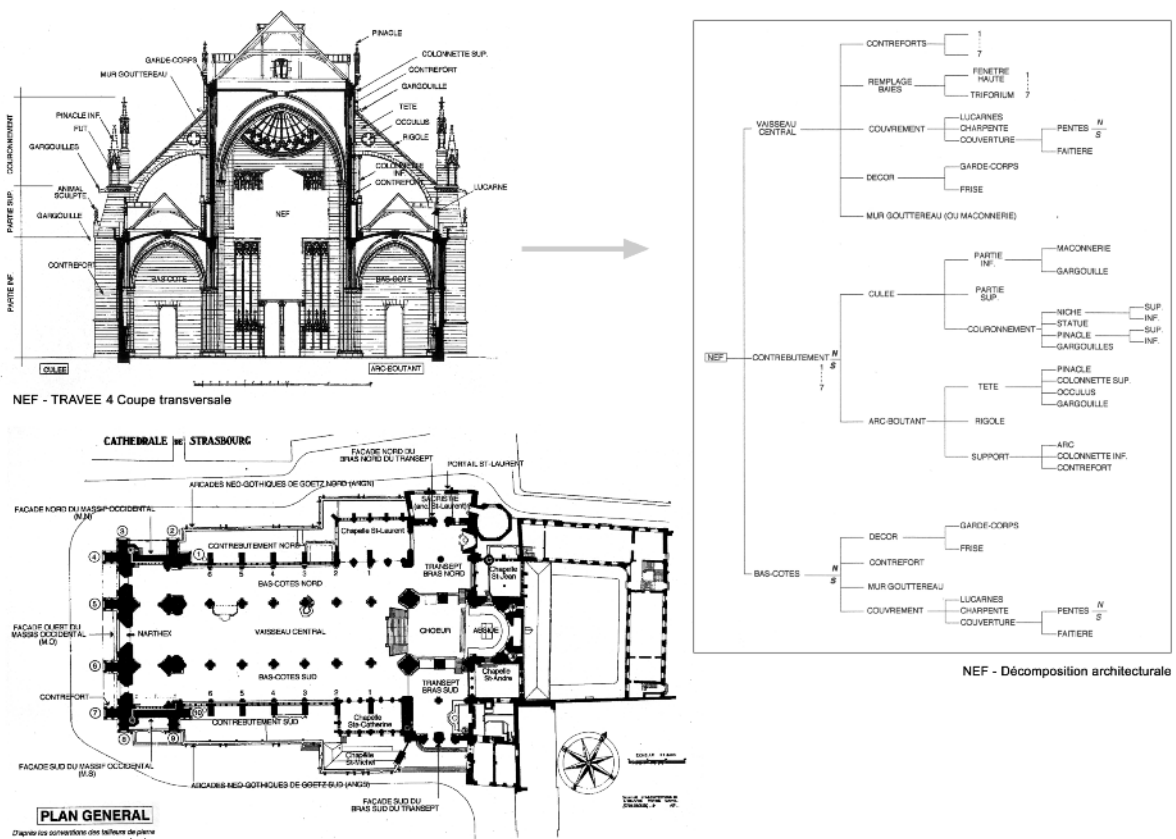


Figure 2. Décomposition architecturale de la nef de la cathédrale de Strasbourg.

Jean-Marie Pérouse de Montclos, «Principes d'Analyse scientifique d'un Vocabulaire de l'Architecture», car cet ouvrage présente plusieurs avantages. Il permet, en premier lieu, de proposer une organisation générale pour l'Édifice en tant qu'objet architectural, qui sera utilisée lors de la phase de décomposition architecturale. Les définitions proposées sont celles qu'utilisent les Architectes en Chef des Monuments historiques en France; or les travaux réalisés sur la cathédrale de Strasbourg sont sous la responsabilité d'un de ces Architectes, la cathédrale étant propriété de l'État en tant que Monument historique. C'est donc ce vocabulaire qui est employé actuellement dans les chantiers de restauration de la cathédrale, ce qui permet d'établir des «passerelles» entre tous les intervenants concernés par le modèle numérique [4].

### **Recomposition infographique**

On intègre la hiérarchie que nous venons de décrire dans le logiciel lors de la modélisation en utilisant le niveau bas de la décomposition architecturale comme premier niveau d'agrégation des éléments modélisés; les niveaux supérieurs de l'arbre hiérarchique architectural sont repris par des repères fictifs numériques dans des relations «parents – enfants». On «recompose» ainsi infographiquement le modèle 3D en suivant la décomposition architecturale, sorte de traduction d'un principe couché sur papier vers l'ordinateur. La clarté de cette décomposition-recomposition est essentielle dans l'optique d'une réutilisation du modèle 3D par différents utilisateurs, les applications de la modélisation étant très diversifiées.

### **Double classement architectonique et chronologique**

Sur le principe de hiérarchisation architectonique que nous venons de décrire doit venir se superposer un classement chronologique. En effet, l'objectif principal de cette modélisation étant la restitution de l'histoire de la construction, il fallait trouver un système qui permette de pouvoir gérer à la fois les repères architecturaux ainsi que les phases de constructions successives; celles-ci sont définies par rapport aux études historiques et sont reprises sous la forme de repères numériques (à l'instar de ceux de la décomposition infographique), par exemple par les termes “*Transept Nord 1210-1225*” pour la période de construction concernant le transept nord entre 1210 et 1225. La figure 3 montre par un “code couleur” la traduction infographique de ce principe sur la partie ouest de la cathédrale (chevet et bras du transept).

---

[4] Il est intéressant de noter qu'à l'occasion de ce travail de décomposition architecturale que j'ai réalisé préalablement à tout travail sur ordinateur, il a été demandé d'essayer d'établir des ponts entre les définitions des Monuments historiques, le vocabulaire utilisé par les artisans de l'Œuvre Notre-Dame, ainsi que leur traduction en dialecte alsacien et en allemand, l'objectif étant d'homogénéiser le vocabulaire employé par tous les intervenants sur l'édifice. Cette application inattendue d'une des phases de la méthodologie informatique illustre bien le fait qu'un des objectifs de cette maquette numérique est d'être facilement partagée avec un utilisateur étranger au projet, ce qui garantit la pérennité du travail de restitution et son évolution selon les derniers résultats des recherches en cours.

### **Précision du modèle numérique**

La principale contrainte de la modélisation informatique consiste dans la régularité intrinsèque des formes créées, confrontée à la réalité du bâtiment qui admet bien des exceptions géométriques, aussi bien en plan qu'en élévation, inhérentes aux principes de construction du Moyen Âge; la moindre tentative de systématisation dans la modélisation de la cathédrale est vouée à l'échec, les «liaisons» entre éléments ne se faisant plus. C'est pour cette raison qu'il faut faire subir des «déformations» au modèle 3D pour que tous les points de jonction (angle des transepts et du chœur par exemple) respectent la réalité de l'existant. On procède au calage des éléments grâce aux documents photogramétriques concernant les façades que l'on superpose au modèle numérique; on obtient ainsi une sorte de «cage photogramétrique» (fig. 4) que l'on complètera pour les éléments occultés par des relevés sur place. Cette phase, presque aussi importante que la modélisation elle-même, permet d'obtenir la précision la plus élevée possible dans le modèle 3D. Ce souci d'exactitude et de rigueur du modèle numérique est essentiel car dans le cadre d'une restitution architecturale et archéologique, tous les éléments constructifs peuvent se révéler extrêmement importants pour telle ou telle hypothèse de restitution, et doivent donc être réalisés le plus finement possible selon leur «rôle» dans l'édifice. On obtient ainsi un modèle viable pour la validation d'hypothèses archéologiques, aujourd'hui et dans le futur, la marge d'erreur acceptable étant pratiquement nulle sur chaque élément modélisé, et de 10 à 20 cm sur l'implantation générale de la cathédrale.

### **Modélisation géométrique**

La modélisation, c'est-à-dire la démarche qui consiste à informer le modèle sur la morphologie de l'objet, s'effectue par des primitives géométriques auxquelles on applique des opérations de transformation, d'union ou de mutation; d'autres techniques de modélisation comme les surfaces de révolution, d'extrusion, les surfaces NURBS, etc., communes à la majorité des logiciels 3D, sont utilisées selon le type et la morphologie de l'élément à modéliser (fig. 5). Il est indispensable, lors de cette première phase de modélisation, de veiller à la réalité constructive du modèle, rien n'étant plus facile que de faire «léviter» un élément dans l'univers numérique. Pour ce qui est de la partie «sculptures», les capacités des outils informatiques actuels ne permettent pas de gérer le «poids» informatique de l'ensemble de la statuaire de la cathédrale; par conséquent les sculptures ne sont modélisées que si elles présentent un intérêt essentiel (Pilier des Anges, par exemple).

### **Principe du «mapping» ou placage d'image**

La mise en textures du modèle numérique ou «mapping» est fondée sur un principe très simple: il faut concevoir des textures planes à base de photos réelles ou complètement fabriquées (définies par leur couleur, leur luminosité, leur brillance, leur relief,...) que l'on vient «plaquer» sur les objets modélisés (fig. 6). On obtient, dans le cas d'un mur par exemple, une texture répétitive qu'il faut beaucoup travailler pour

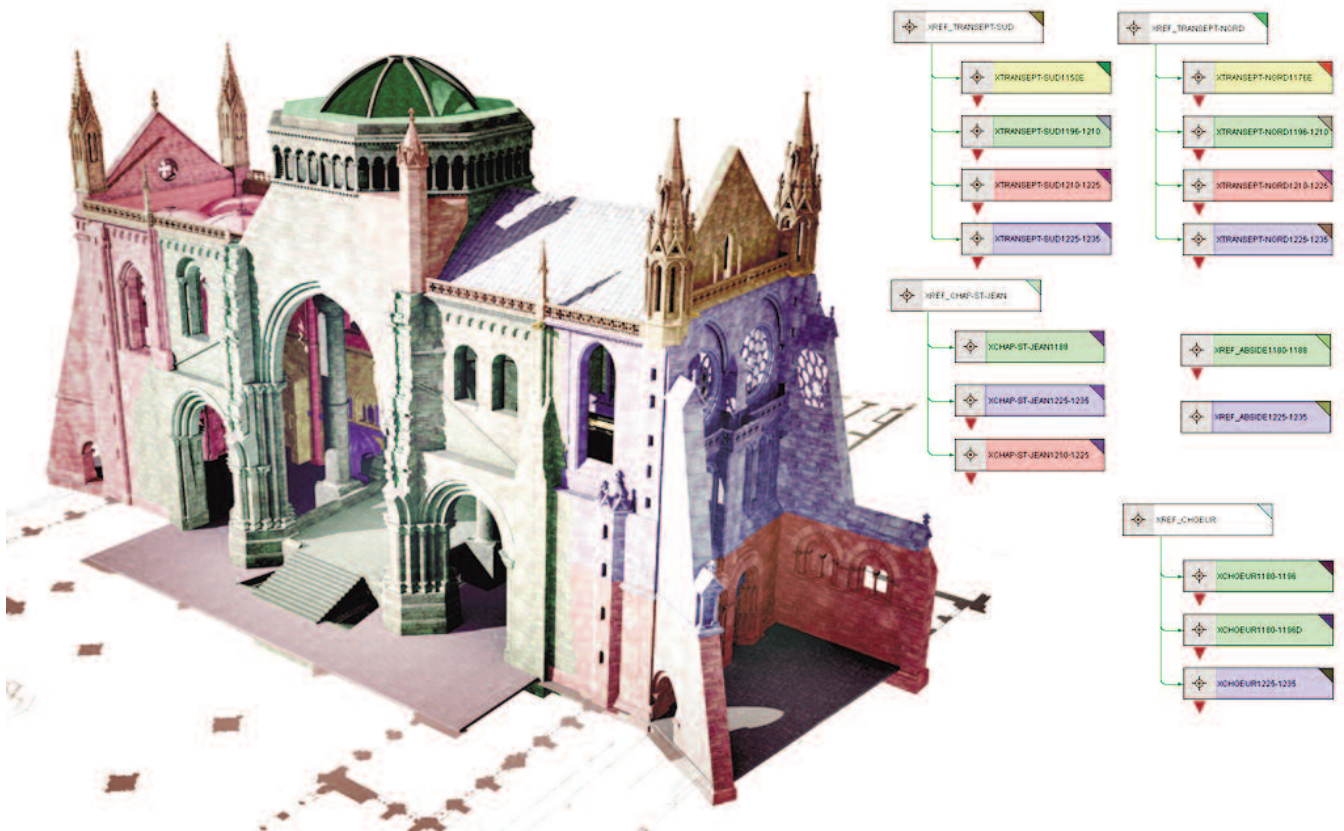


Figure 3. Classement chronologique du chevet et des transepts. Chaque code couleur représente une campagne de construction.

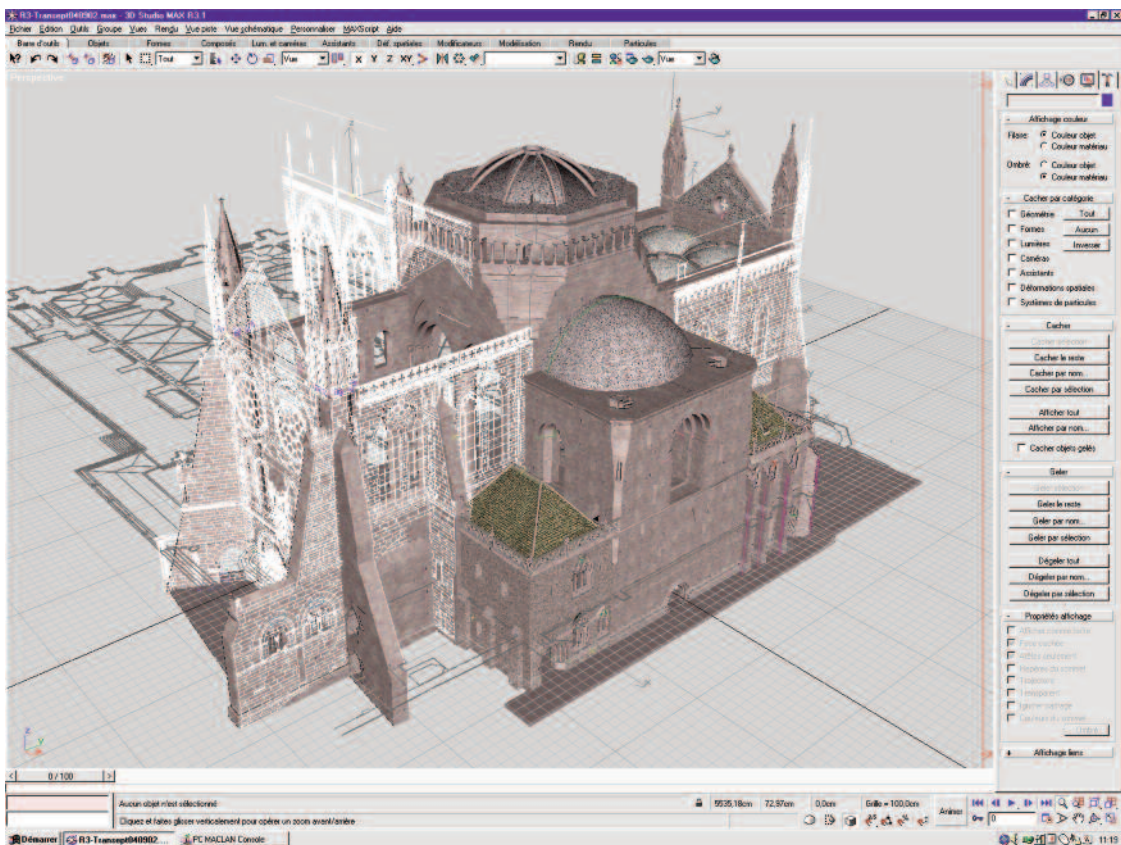


Figure 4. Principe de la "cage photogrammétrique" permettant le calage et la déformation du modèle numérique.

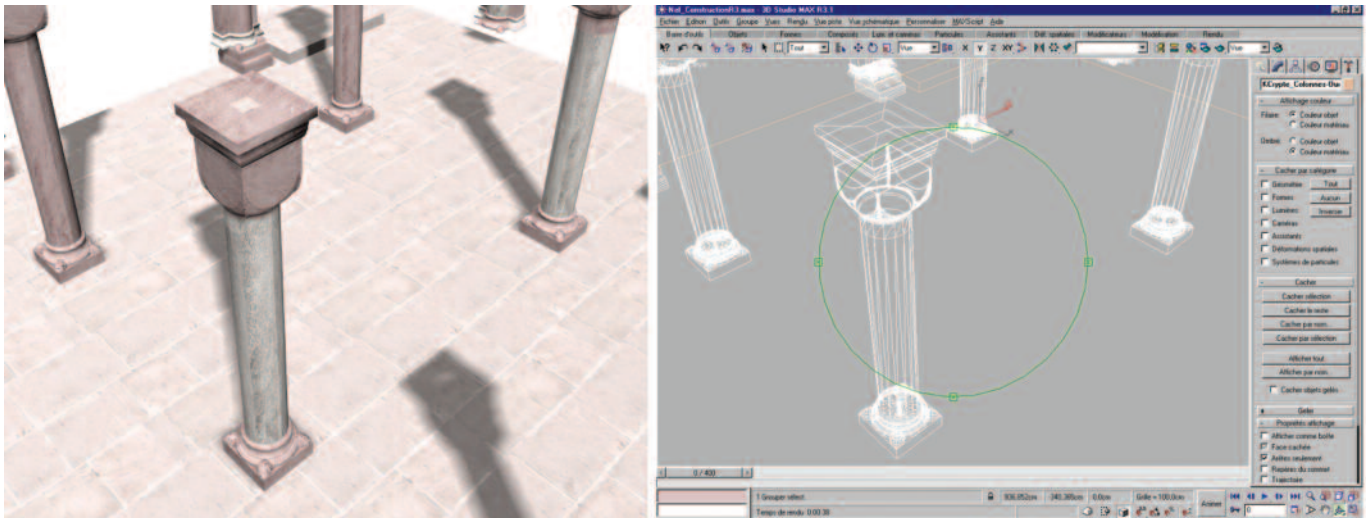


Figure 5. Colonne de la crypte obtenue par surface de révolution pour le fût, le tailloir et la base, surface Nurbs à double-rail pour le chapiteau, et primitive déformée pour les griffes de la base.

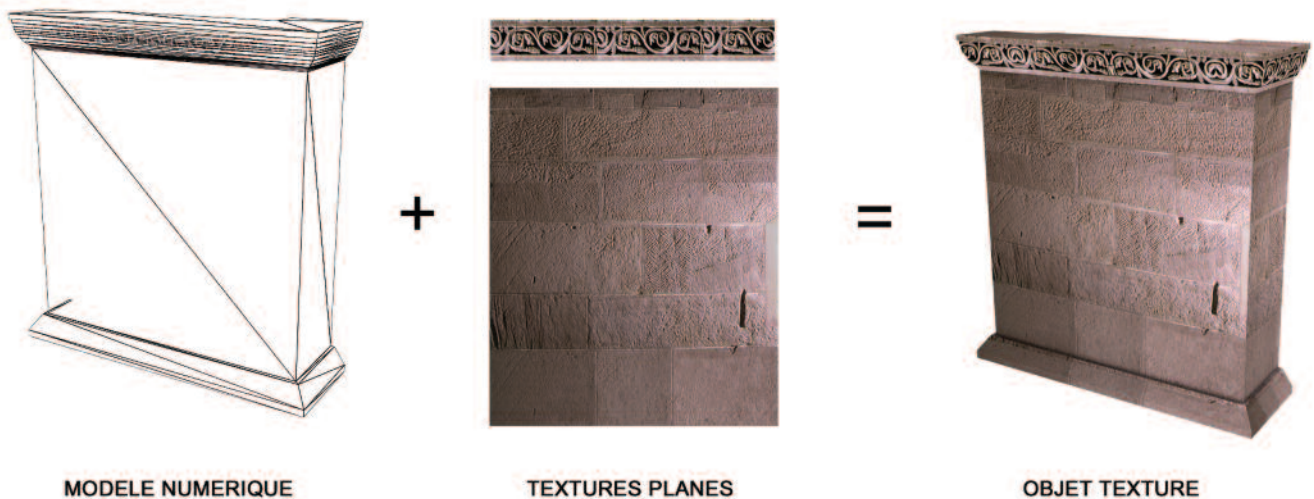


Figure 6. Principe de mise en texture appliqué à un des pilastres de la crypte.

éviter un effet de «tapisserie» au niveau des raccords entre textures. Le rôle des textures n'est pas uniquement décoratif, mais comporte un caractère informatif dans la mesure où l'on respecte les assises horizontales (en se calant sur les photographies).

Les principes de modélisation que nous venons d'évoquer sont en pratique indépendants de la plate-forme ou du logiciel utilisé (dans notre cas, 3DstudioMax), car tous les logiciels professionnels, pour ce qui est de la modélisation d'architecture, fonctionnent de la même manière, avec la même logique et les mêmes outils; seule l'interface utilisateur diffère.

### Principes de restitution archéologique et architecturale

A travers quatre exemples, qui correspondent aux objectifs fixés dans le projet (restitution archéologique pour historiens

de l'art et autres chercheurs – communications au public – formation professionnelle des artisans), nous allons examiner quels sont les mécanismes qui régissent les rapports entre intervenants (architecte, historien de l'art ou archéologue, artisan) et médium informatique, comment l'outil 3D peut être utilisé, et surtout comment les stratégies de modélisation interagissent avec la formulation d'hypothèses de restitution.

### Restitution architecturale des étapes de construction de la cathédrale entre 1015 et 1225

#### Processus de validation des hypothèses de restitution

La restitution dans l'ordre chronologique des étapes de construction de la cathédrale s'appuie sur:

- la très importante documentation disponible: articles et études (notamment dans le Bulletin de la Cathédrale de

Strasbourg, les monographies de divers auteurs, les ouvrages plus généraux, les textes et descriptions d'époque, etc.), plans de l'édifice (plus de 2500) dont la quasi totalité des façades extérieures en photogrammétrie

- l'étude *in situ* de l'édifice et des traces archéologiques
- les discussions avec les historiens de l'art et les artisans.

Dans ce cadre, la modélisation 3D, réalisée avec la méthodologie très stricte que nous venons de décrire, permet de disposer d'un outil de formulation d'hypothèses archéologiques qui constitue une base de discussion avec les historiens de l'art et les artisans, collaboration interdisciplinaire indispensable. Ce travail de restitution en images de synthèse comporte par nature un caractère hypothétique; il convient donc d'effectuer un travail de validation collégial des hypothèses de restitution: l'architecte apporte une vision d'ensemble dans la restitution, recherche la cohérence structurelle (surtout pour ce qui est de la réalité constructive dans le modèle numérique) et architecturale, et essaye de «se mettre à la place», toutes proportions gardées, des constructeurs de l'époque en recherchant les éléments qui ont prévalu lors de la conception et de la construction de la cathédrale: à quelles influences le maître d'œuvre était-il soumis, avec quelles contraintes a-t-il du composer, quels acquis techniques et architecturaux avait-il à sa disposition [5].

L'historien de l'art étudie la cohérence stylistique des restitutions selon les périodes de construction, apporte sa connaissance globale de l'architecture et des analogies avec les édifices que l'on peut rattacher à l'étude, et valide (ou invalide) sur cette base les restitutions architecturales. L'artisan, en tant que praticien, héritier des méthodes de construction, surtout dans la cas de l'Œuvre Notre-Dame, confronte les hypothèses aux traces présentes sur le bâtiment (comme les traces d'outil sur les blocs de grès) et apporte son expérience unique de bâtisseur. Bien sûr, tout n'est pas aussi compartimenté sur le terrain et chacun apporte sa «pierre» selon sa sensibilité; on constate, en pratique, une émulation très importante entre les intervenants. Comme il a déjà été dit, il ne faut pas considérer les hypothèses formulées comme définitives. Ce travail sert surtout de base à des discussions nouvelles, l'occasion de réinterpréter les traces existantes, lancer de nouvelles pistes.

### Implications de l'outil 3D dans la restitution

Grâce à la modélisation numérique, on bénéficie d'une approche permettant de mesurer la capacité d'analyse, de compréhension et de conception de l'outil. Au surplus, on profite aussi d'une dimension supplémentaire très importante pour la formulation d'hypothèses architecturales dont la validation,

---

[5] Cette approche s'inspire de celle proposée par R. Bechmann, qui a analysé les facteurs qui ont conditionné l'architecture des cathédrales (contexte économique, sociologique, politique, environnemental, transmission de la connaissance) dans plusieurs de ses ouvrages, dont: *Les racines des cathédrales*, Paris, 1981, ou *Villard de Honnecourt, la pensée technique au XIII<sup>e</sup> siècle et sa communication*, 1993.

limitée à une représentation plan/coupe/élévation, est bien moins maîtrisable qu'avec des visualisations en trois dimensions (notamment en termes de géométrie et «d'accrochages» entre structures). Cette possibilité donnée, par l'outil informatique, de disposer à tout moment de plusieurs visualisations tridimensionnelles, en fonction des hypothèses formulées, nécessite l'emploi de modèles évolutifs pouvant s'adapter à toutes les modifications souhaitées avec facilité et rapidité.

L'outil 3D permet alors d'instaurer un aller-retour permanent entre les intervenants car il constitue un modèle évolutif: en effet, chaque objet modélisé possède la «mémoire» de sa création [6]; ainsi peut-on, à tout instant, modifier très facilement n'importe quel élément dans le cadre d'une variante d'hypothèse de restitution, à son niveau ou à un niveau supérieur, grâce à la hiérarchie instaurée par la décomposition architecturale. Sur un même modèle numérique, on peut donc disposer de plusieurs hypothèses de restitution archéologique et chronologique, que l'on peut faire évoluer en temps réel, la modélisation en trois dimensions devenant alors un véritable outil de formulation d'hypothèses archéologiques. Le travail de modélisation 3D, conformé pour pouvoir être évolutif, doit donc agir comme une base de discussion entre les différents intervenants.

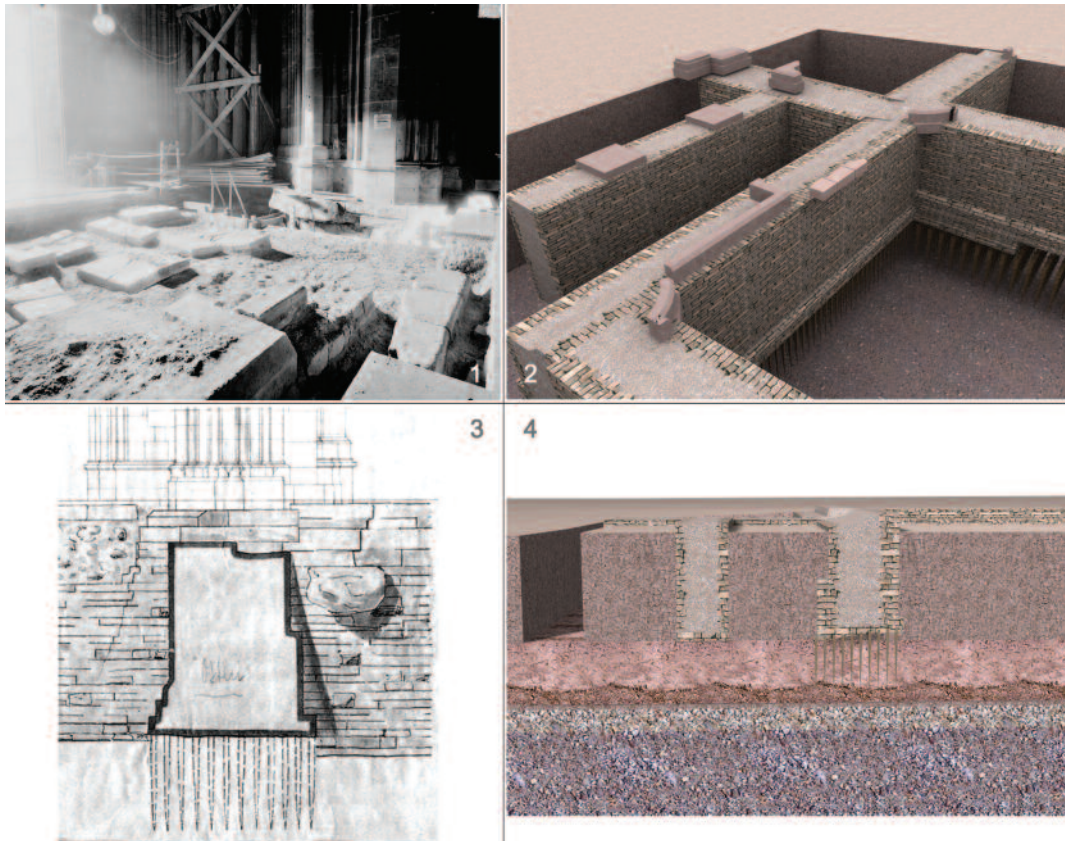
Dans ces conditions, le rôle des historiens de l'art, artisans et autres spécialistes n'est pas d'apporter une caution absolue à toutes les propositions, mais d'avoir un regard critique, essentiel pour des échanges de compétences productifs.

### Hypothèses de restitution

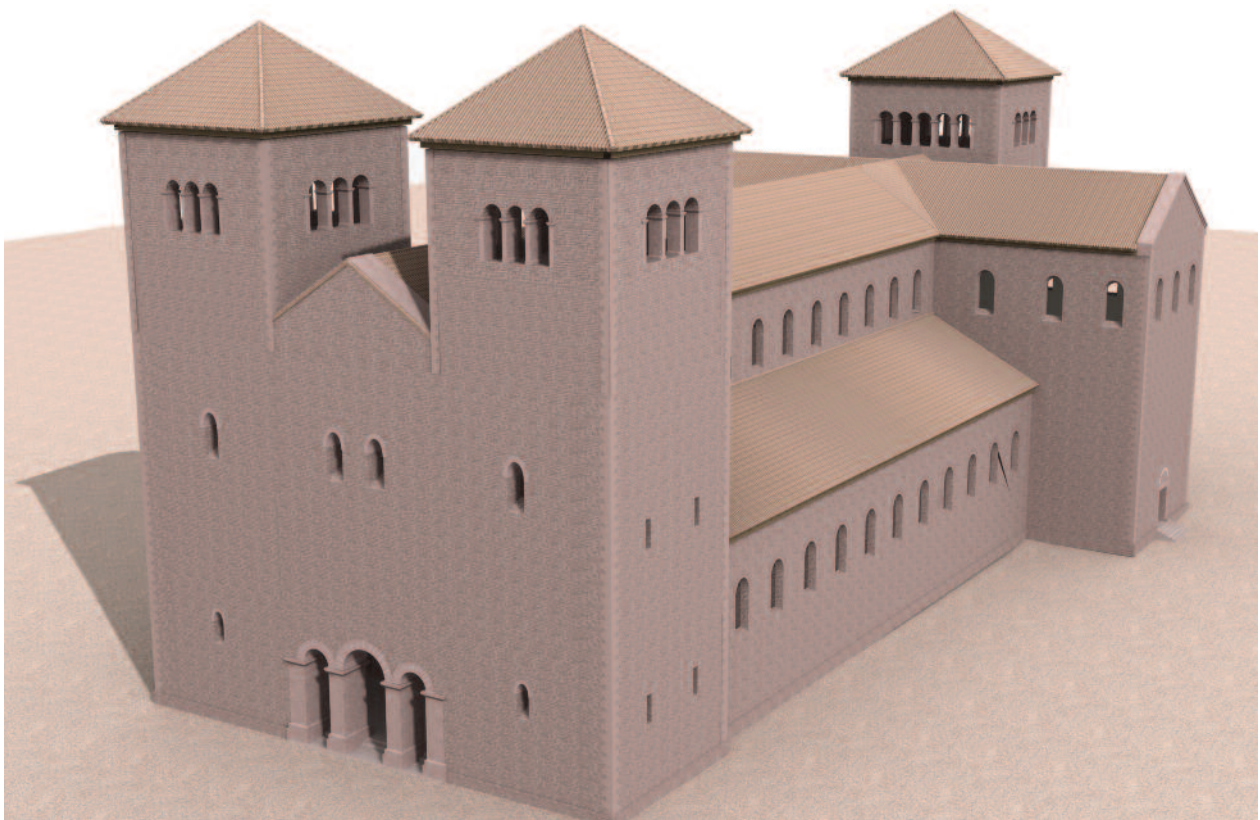
Contrairement au dessin ou à l'illustration 2D, le modèle 3D ne permet aucun «angle mort» dans la restitution; celle-ci doit être exhaustive. Dans le cas de la restitution de la «basilique de Werner» (1015-1048), il y a pourtant peu de traces archéologiques, surtout en élévation; schématiquement, on connaît cependant l'implantation au sol (par les fouilles de 1906-1913 sous le massif occidental, à l'occasion des travaux de reprise en sous-œuvre du pilier nord-est (fig. 7), par les fouilles de 1932 dans la crypte,...), la hauteur sous toiture des bas-côtés (grâce à la présence de solins toujours en place sur les parois ouest des bras du transept), la hauteur du transept ottonien (par les arrachements des parois orientales des bras du transept), la taille des baies (par la restitution des vitraux d'origine à partir des fragments réutilisés dans les vitraux gothiques). De manière générale, un travail analogique à partir d'une analyse des églises du bassin rhénan permet de proposer une restitution cohérente de l'édifice (fig. 8). Les éléments étant insuffisants pour que cette restitution soit «définitive», et grâce au caractère évolutif du modèle informatique, nous pouvons proposer d'autres variantes, notamment pour le

---

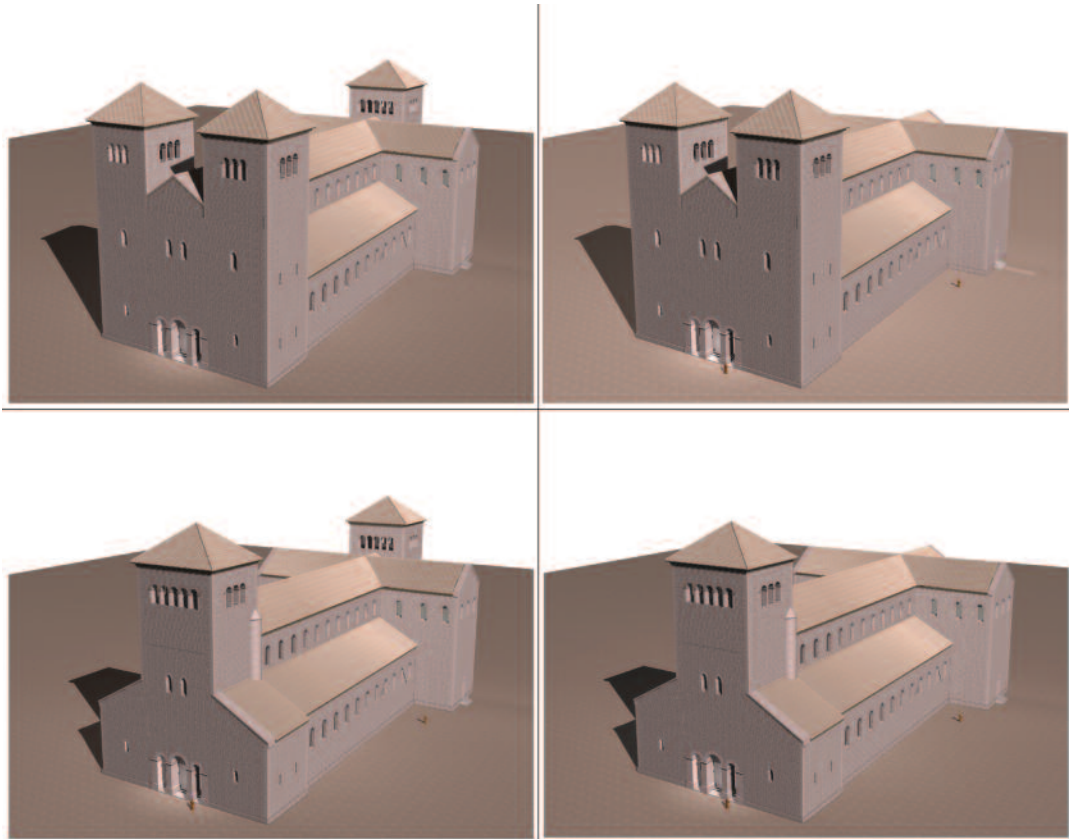
[6] Le processus de création de chaque élément modélisé dans le logiciel est stocké dans une «pile» comportant la primitive ou le tracé géométrique de base, les «modificateurs» de l'élément, ainsi que les coordonnées de texture, toutes ces opérations étant modifiables à n'importe quel moment. Les agrégations et hiérarchies d'éléments sont elles aussi réversibles.



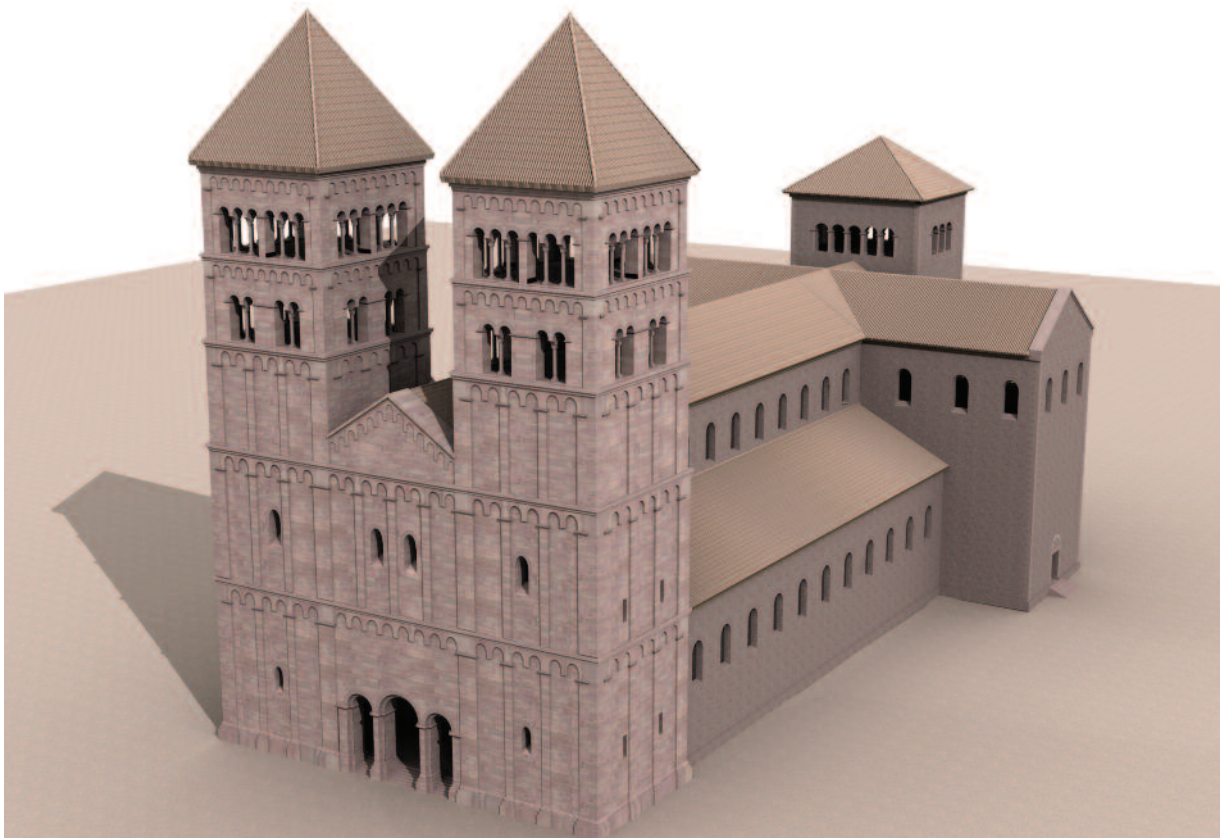
*Figure 7.* 1: photo de 1906-1913 montrant les fouilles sous le pilier nord-est du narthex avant reprise en sous-œuvre; 2: modélisation des vestiges sous le narthex à partir des relevés de Knauth; 3: dessin du massif de fondation roman sous le pilier nord-est du narthex; 4: restitution de la composition du sol depuis le dallage de la nef jusqu'à la nappe phréatique (prof.: 7 mètres) à partir de sondages géologiques.



*Figure 8.* Restitution de la basilique de Werner (1015-1048).



*Figure 9.* Hypothèses de restitution des tours de façade et de chevet de la basilique de Werner.



*Figure 10.* Restitution de la basilique après l'incendie de 1130.



chevet (présence d'une tour de chevet ?) ou pour la façade (à une ou à deux tours ?) (fig. 9).

Le même processus (analyse des traces existantes, étude documentaire, formulation d'hypothèses de restitution 3D, discussion et validation de celles-ci par historiens de l'art et artisans) est employé pour la restitution de la basilique en 1130 (incendie et reconstruction du massif occidental) (fig. 10), ainsi que dans tous les états ultérieurs; la représentation en coupe perspective qui inclut les structures des éléments coupés (remplissage, noyaux,...), telle celle de la basilique de 1130 (fig. 11), est un outil de visualisation très efficace permettant d'embrasser de façon synthétique l'ensemble des hypothèses globales formulées.

### Validation d'hypothèses à l'aide de l'outil 3D

On peut, dans certains cas, effectuer une validation d'hypothèses de restitution par l'outil 3D, à condition, toutefois, de rester très rigoureux sur la précision du modèle et sur sa cohérence constructive:

- pour vérifier la cohérence de la modélisation de la basilique romane de 1130, notamment la hauteur des bas-côtés, il a fallu intégrer la nef de la basilique aux solins présents aujourd'hui sur la face ouest des transepts nord et sud (1196-1210), qui assuraient, avant la construction de la nef gothique (1235-1250), l'étanchéité de la couverture des bas-côtés de la nef ottonienne (fig. 12). La modélisation des solins, puis leur calage sur le modèle numérique grâce aux photogrammétriques, nous permettent donc d'attester de l'altitude et de la pente de la toiture des bas-côtés dans le modèle numérique

- l'étude des différentes phases de constructions du chevet et des bras du transept de la cathédrale a d'abord été fondée sur un article de 1932 d'Etienne Fels [7] qui fait foi encore aujourd'hui, globalement repris par R. Recht et L. Grodecki en 1971 [8]. La modélisation exhaustive de ces hypothèses a permis de confronter, entre extérieur et intérieur, les différences d'assises marquant les abandons et reprises de chantier, contrairement à l'étude de Fels qui ne prend pas en compte la totalité des traces (surtout extérieures). Il s'en est suivi un certain nombre d'incohérences (comme un déliaisonnement d'assises non concordant entre les faces intérieures et extérieures d'une même paroi) immédiatement visualisables sur le modèle numérique. De nouveaux questionnements sont donc apparus, de nouvelles hypothèses ont été formulées, et la vérification *in situ* s'est faite beaucoup plus efficacement, car on savait ce que l'on cherchait. Un exemple parmi d'autres concerne la tourelle d'escalier intérieure de l'angle sud-ouest du bras sud du transept. E. Fels avait supposé qu'elle avait été construite sur toute sa hauteur dans une même campagne de construction, mais l'étude approfondie des traces présentes sur le

mur ouest du transept, suite à la modélisation 3D, montrait que cette tourelle avait été élevée en deux campagnes successives (1210-1225 et 1225-1235), avec un arrêt à peu près à mi-hauteur. En allant sur place, à l'intérieur de cette tourelle, nous avons alors remarqué que les signes de tâcherons, qu'il faut cependant considérer avec beaucoup de précautions [9], visibles au niveau supposé du changement de campagne, marquaient un changement d'équipe de taille, confirmant ainsi les traces existantes. Un nouveau découpage a donc été proposé [10] (fig. 13). Mais la campagne de 1196 à 1210 posait un problème: il n'était pas dans la logique du chantier d'arrêter la construction des murs occidentaux des bras du transept à la verticale des bas-côtés de la nef du XIe siècle. L'explication la plus logique est que dans l'optique d'une continuité d'utilisation de la partie ottonienne encore existante (nef et massif occidental) avec le chœur et l'abside fraîchement construits, on ait monté des cloisons provisoires en bois séparant les bas-côtés et le chœur des bras du transept nord et sud dont le chantier allait démarrer (fig. 14). Ainsi, le continuateur du maître du chœur pouvait-il édifier le bras nord du transept et la base du bras sud du transept sans gêner le déroulement des offices dans la cathédrale, et le premier maître gothique finir le bras sud transept [11], alors que le bras nord pouvait déjà être mis en service.

### Superposition de campagnes de construction

Il existe, dans la cathédrale, différentes zones où plusieurs campagnes de travaux appartenant à des périodes de construction distinctes se sont superposées, ce qui pose un problème dans le classement chronologique appliqué au modèle numérique (cf. 1er partie). Le portail de la chapelle Saint-Jean vers le bras nord du transept (fig. 15), le portail du bras sud du transept - dont les arcs surplombant les deux ouvertures (1210-1225) ont été retaillés lors de la campagne suivante (1225-1235) pour l'installation d'un tympan plus grand -, ou encore le contrefort du mur est du bras nord du transept (fig. 16) illustrent bien cette problématique. Celle-ci se gère dans le classement chronologique du modèle par l'adjonction à la datation d'une période de construction de la lettre E pour "Existant", ou de la lettre D pour "Démoli".

### Restitution du chantier de la nef

La restitution du chantier de construction de la deuxième travée est de la nef de la cathédrale (vers 1235-1250) (fig. 17) comprend la restitution des bas-côtés nord et sud (détruits en

[7] Etienne Fels, Le chœur et le transept de la Cathédrale de Strasbourg – Étude architecturale, Bulletin de la Société des Amis de la Cathédrale de Strasbourg, 1932.

[8] Louis Grodecki et Roland Recht, Le bras Sud du transept de la Cathédrale: Architecture et sculpture, Bulletin monumental, 1971, pp. 7-38.

[9] Ces signes ne peuvent en aucun cas être ici une preuve de datation.

[10] La décomposition en quatre campagnes principales entre 1180 et 1225 (excepté le couvrement du bras sud du transept, qui appartiendrait à la campagne de la nef) est communément admise, avec des variations pour les dates de début et de fin de chaque période. Les datations proposées restent donc ouvertes au débat.

[11] Lors du colloque, la persistance d'un schéma ottonien dans la reconstruction de plusieurs cathédrales a été plusieurs fois évoquée. Nous avons, avec le chevet et les bras du transept de la cathédrale de Strasbourg, un exemple de cette persistance de l'organisation ottonienne due à des campagnes de reconstruction partielles où chaque maître d'œuvre devait tenir compte des travaux de son prédécesseur, jusqu'au premier maître gothique qui éleva le pilier des anges dans le bras sud du transept.

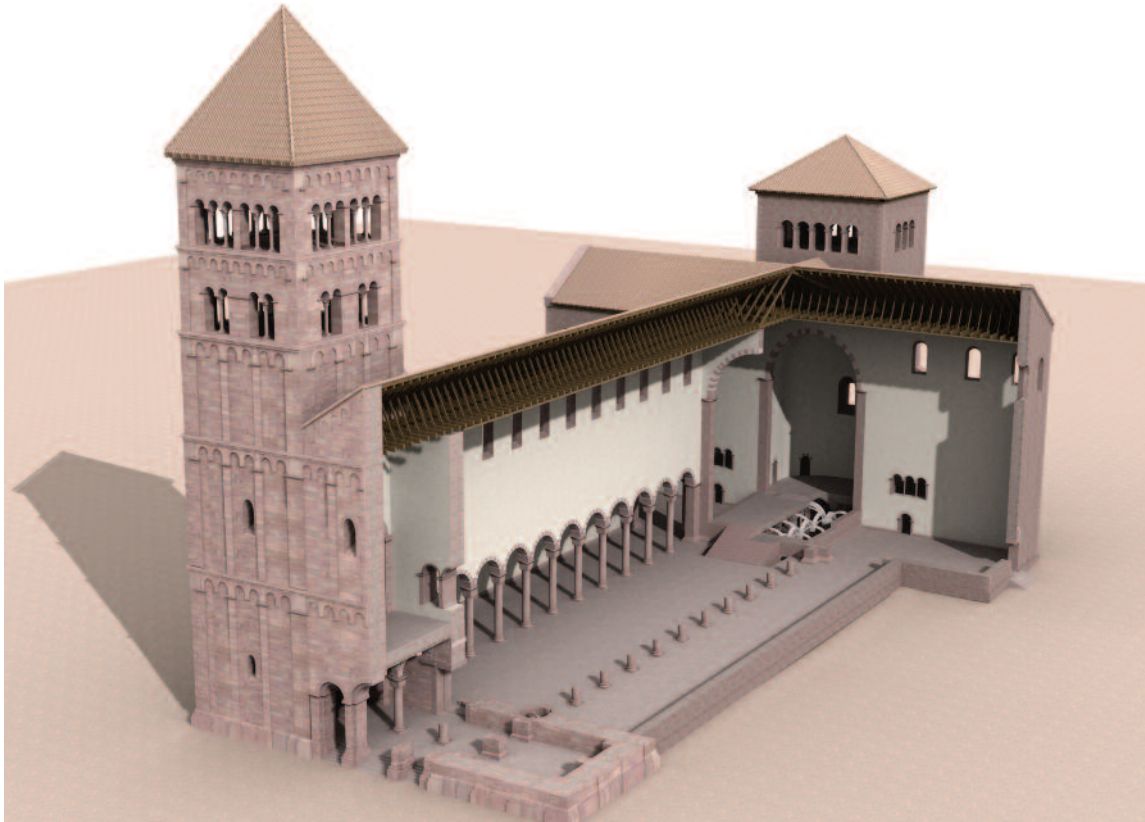


Figure 11. Coupe perspective sur la basilique de 1130.

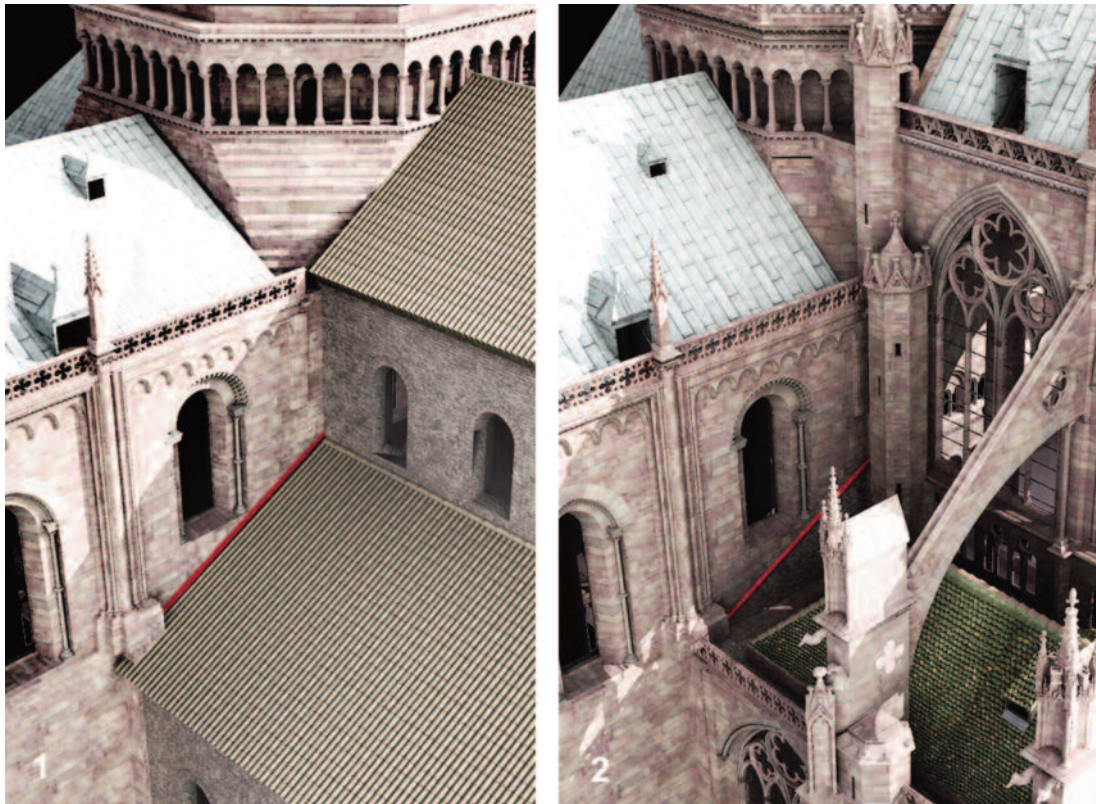


Figure 12. Restitution de l'accrochage entre la nef ottonienne et la paroi ouest du transept Nord - en rouge, le solin toujours existant. 1, état 1225; 2, état 1250.

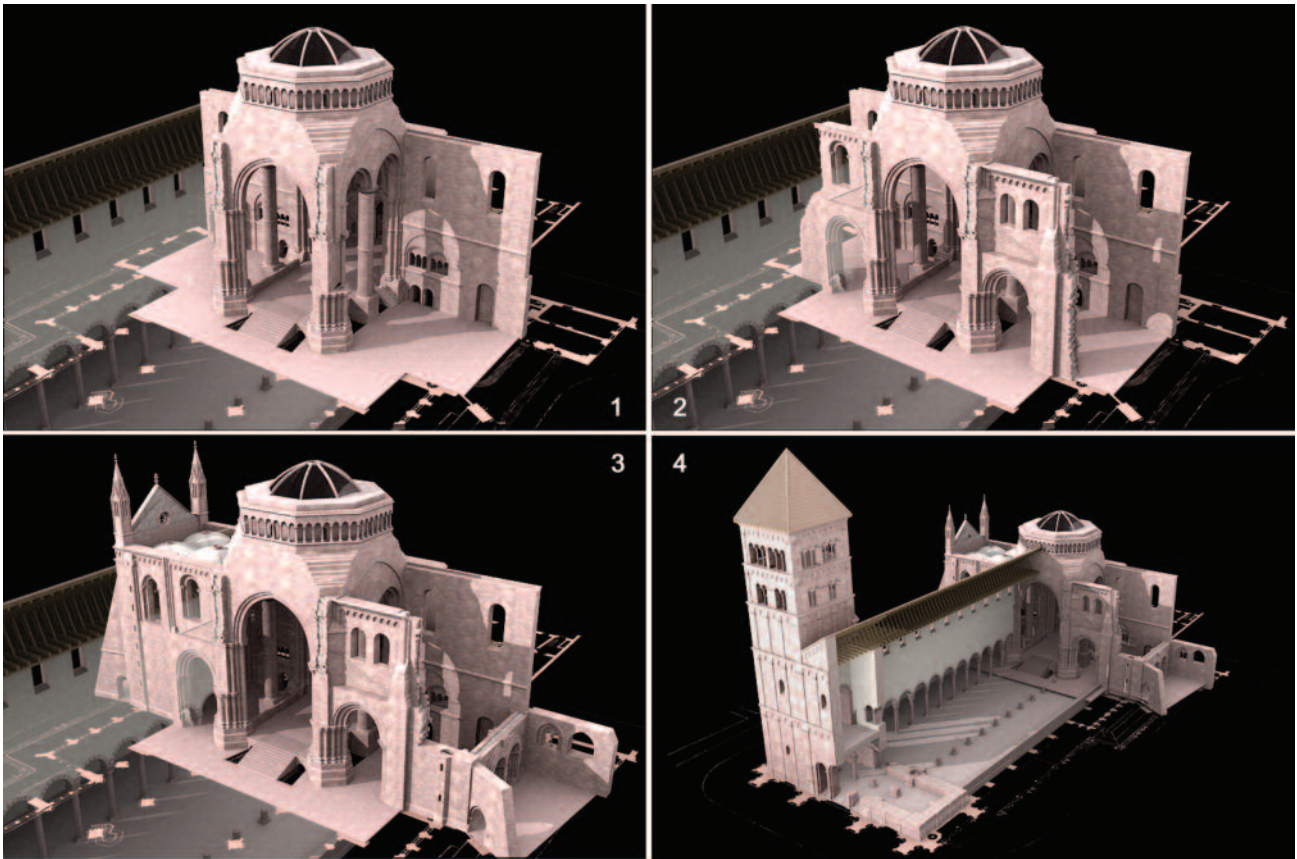


Figure 13. Restitution des campagnes de construction du chevet et des bras du transept (campagne 1225-1235 en cours de réalisation). 1: 1180-1196; 2: 1196-1210; 3: 1210-1225; 4: vue d'ensemble vers 1225 avec la nef et le massif ottonien toujours en place.

partie pour faire place aux chapelles Saint-Martin et Sainte-Catherine au XVI<sup>e</sup> et au XVII<sup>e</sup> siècle) en se fondant sur les principes de restitution décrits plus haut, mais s'appuie surtout sur l'existant pour tenter de retrouver l'ordre et la manière dont cette travée a été montée.

Il a ainsi fallu restituer un système d'échafaudages et de cintrages en bois pour l'élévation et la construction du couvrement sur les bas-côtés et le vaisseau central à partir des trous de boulins visibles sur la travée: leur présence constatée uniquement sur les contreforts et les murs gouttereaux, nous a ainsi conduit à proposer un système d'échafaudage qui présente un équilibre statique en prenant appui sur les piédroits supérieurs de la baie et en reposant à l'intérieur sur le glacis du triforium (fig. 18), avec comme contrainte technique la présence de trois perches maximum par nœud. De la même manière, l'hypothèse de cintrage des arcs-boutants présentée n'est pas la seule solution possible, si on la compare aux travaux de restauration de 1897 qui montre un système triangulé avec cales, système consommant moins de bois (fig. 19). Les restitutions gardent donc un caractère hypothétique qu'il convient de signifier le plus possible pour ne pas induire l'observateur en erreur.

L'animation complète, telle qu'elle a été présentée lors du colloque, montre aussi l'élévation du couvrement d'un bas-côté (avec le rôle de la clef comme guide lors du montage des claveaux), la restitution d'une machine de chantier à par-

tir d'un croquis de 1485 de H. Hammer, celle d'une roue d'écureuil permettant le levage des pierres ou des pièces de bois depuis la charpente du vaisseau central (fig. 20), la représentation des systèmes de levage comme la griffe ou la louve. Cette restitution «dynamique», qui dépasse les limites du support papier, prend ici tout son sens dans cette animation car la présentation chronologique de tout le processus de construction est communiqué beaucoup plus efficacement que sur un support 2D traditionnel. Elle illustre aussi comment l'image de synthèse peut être utilisée comme outil de communication, autant pour le grand public que pour les chercheurs.

### *Restitution du jubé*

La restitution du jubé de la cathédrale de Strasbourg, construit vers 1250 et démoli en 1682 par Heckler lors de la réintroduction du culte catholique dans la cathédrale par Louis XIV, suit les mêmes principes que ceux utilisés pour la restitution de l'histoire de la construction, mais avec des bases de recherche différentes:

- les gravures du XVII<sup>e</sup> siècle représentant le jubé, notamment celles en perspective de Brunn et de Arhardt, celles figurant le plan de la cathédrale avant 1682 (fig. 21)
- les textes descriptifs de l'aménagement du XVII<sup>e</sup> siècle comme le manuscrit de Heckler, ainsi que les descriptions de la topographie des autels de la cathédrale du XIII<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> siècle

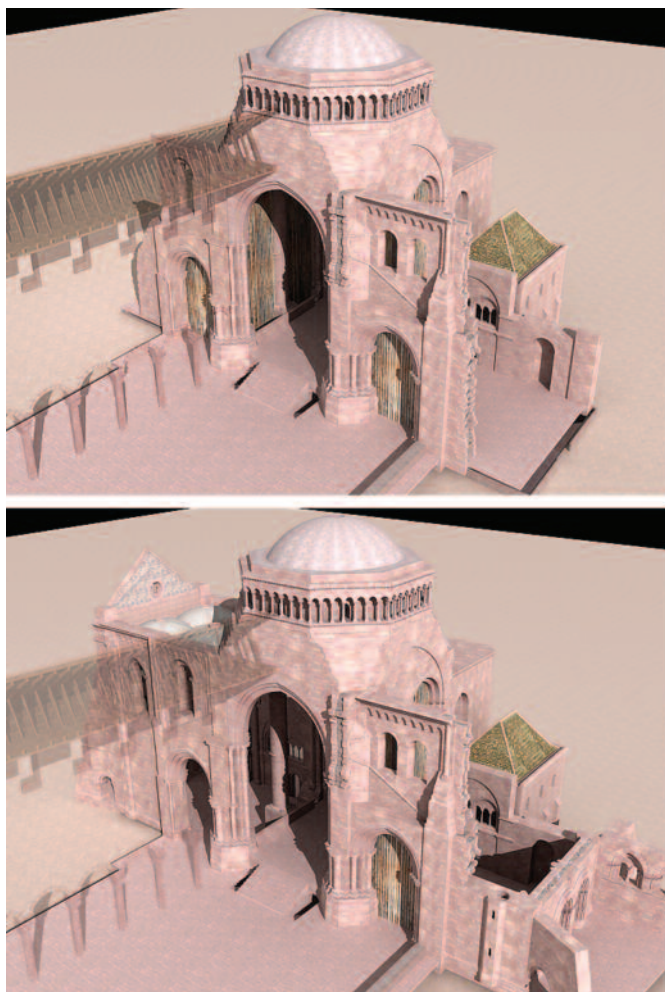


Figure 14. Mise en place de cloisons provisoires de chantier en bois en 1210 (en haut) jusqu'en 1235 (en bas).

- les traces présentes dans le chœur qui témoignent de la présence du jubé, des fragments dispersés recueillis par Klotz lors des travaux de réaménagement du chœur en 1843, des éléments de la statuaire retrouvés par Knauth dans les escaliers de la haute tour en 1893,...

- les restitutions proposées par différents auteurs, dont Arntz et Reinhardt, ainsi que la restitution à l'échelle réalisée par Haug dans le musée de l'Oeuvre Notre-Dame.

La restitution du jubé et la reconstruction de deux de ses travées dans le musée de l'Œuvre Notre-Dame peuvent être considérées, au vu des fragments d'architecture et de statuaire disponibles, comme sûre pour ce qui est de la partie supérieure (notamment gables et couronnement). Nous avons donc, avec l'emprise au sol du jubé dans la cathédrale actuelle (abside, chœur et premiers piliers de la nef) une base solide pour la restitution du jubé lui-même (fig. 22). Celui-ci est rendu sans sa statuaire et son décor sculpté, pour des raisons de «poids» informatique (cf. 1er partie), et aussi parce que ceux-ci ne sont que fragmentaires et donc incomplets. De plus, se pose le problème des aménagements successifs du

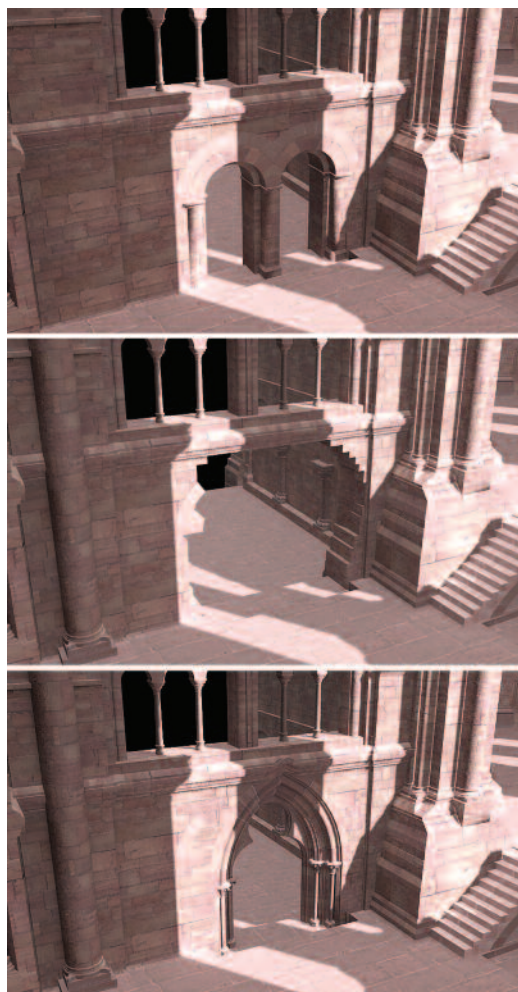
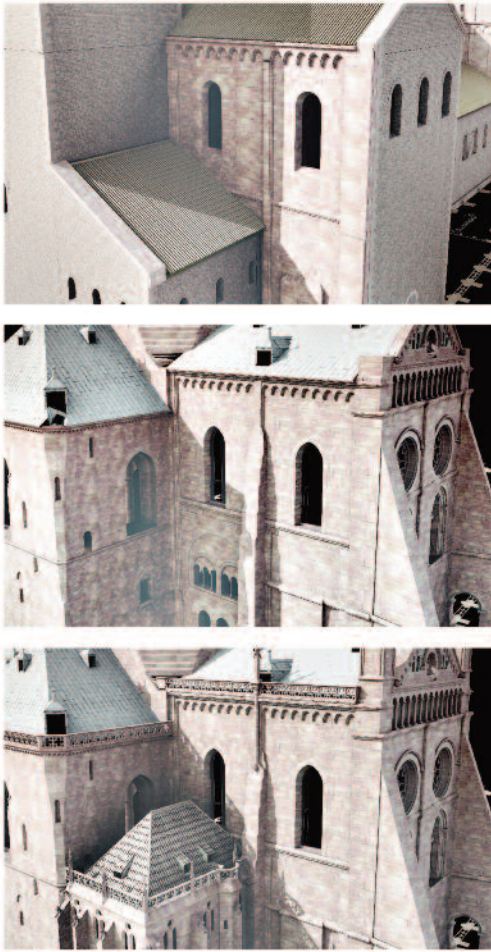


Figure 15. Les trois états du portail de la chapelle Saint-Jean vers le bras nord du transept. En haut, portail de la chapelle romane (1176); au milieu, les traces existantes correspondant à la dépose du portail; en bas, état actuel (1225-1235).

jubé et du chœur entre le XIIIe et le XVIIe siècle, qui reste encore à approfondir, la restitution proposée étant celle de 1250 à 1320.

L'aménagement de l'abside et du chœur, évoqué par les gravures en plan du XVIIe siècle et la description de Heckler de 1736 qui copiait une description de Munschel établie vers 1660, manuscrits aujourd'hui disparus mais entre-temps repris par Schneegans [12], pose de gros problèmes d'interprétation. Ainsi, les deux hypothèses proposées d'après les restitutions de Arntz et de Reinhardt (fig. 23), demandent à être complétées ou modifiées. La présentation de deux possibilités laisse volontairement le choix à l'observateur et ouvre la voie à de nouvelles hypothèses, le modèle informatique jouant le rôle de base de discussion pour la restitution, quitte à faire plus tard des essais pour le mobilier notamment.

[12] Robert WILL, Le jubé de la cathédrale de Strasbourg [...], Bulletin de la Société des Amis de la Cathédrale de Strasbourg, 1972, pp. 57-68.

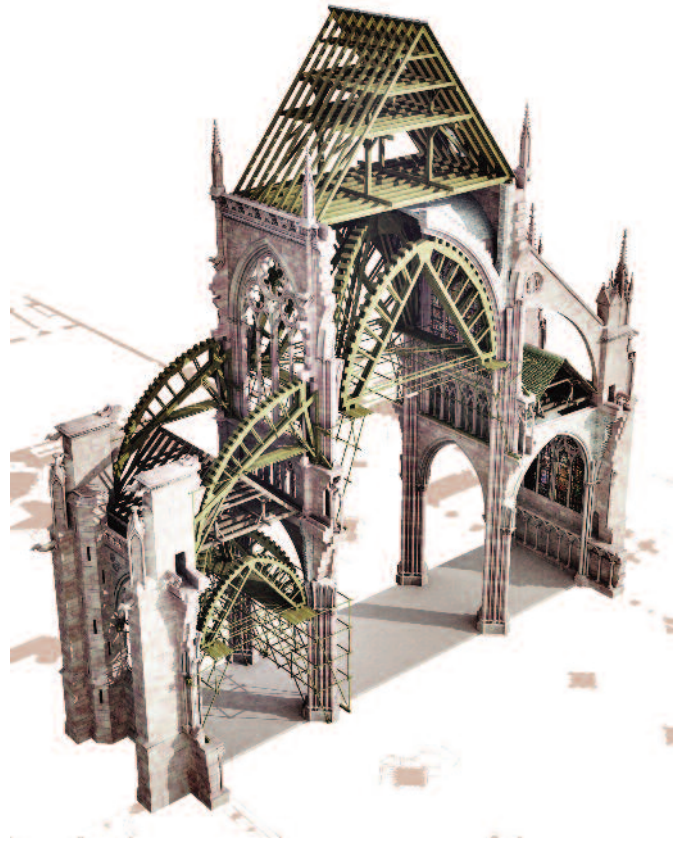


**Figure 16.** Les trois états du mur est du bras nord du transept: en haut, partie supérieure supportant un transept charpenté (1176); au milieu, contrefort 1210-1225; en bas, adaptation au garde-corps et au nouvel écoulement des eaux 1225-1235.

### **Restitution du montage d'une baie gothique**

L'objectif de cette animation présentée lors du colloque concernait la formation professionnelle des artisans de l'Œuvre Notre-Dame. Elle a été réalisée suite à de nombreuses réunions avec eux.

En reprenant comme support la deuxième travée est de la nef de la cathédrale, la baie supérieure de cette travée a été modélisée pierre à pierre à partir des relevés d'appareilleur, pour pouvoir représenter les techniques d'assemblage entre les pierres (système en agrafes, harpage des piédroits) ou entre les éléments du réseau. On a ainsi pu reproduire en 3D le système de liaison verticale entre deux meneaux avec goujon et coulage au plomb grâce aux éléments retrouvés sur des éléments démontés mais surtout par le concours des artisans de l'Œuvre Notre-Dame qui emploient encore aujourd'hui cette technique (figs. 24:1 et 2). Ce principe d'utilisation de goujons entre les claveaux de l'arc et la maçonnerie du mur gouttereau a aussi permis de démontrer que le réseau servait de coffrage à l'arc le surplombant, l'arc lui-même servant de coffrage à la maçonnerie, respectant ainsi le souci d'économie de bois de coffrage essentiel à cette époque.



**Figure 17.** Restitution de la deuxième travée est de la nef et du principe d'échafaudage. Cette image ne respecte pas la chronologie de construction, mais montre la partie sud terminée et la partie nord avec son système de cintrage et d'échafaudage.

L'animation complète, telle qu'elle a été présentée lors du colloque, montre aussi l'élévation du couvrement d'un bas-côté (avec le rôle de la clef comme guide lors du montage des claveaux), le principe de l'appareillage en tas de charge des départs des nervures du vaisseau central et des arcs-boutants (figs. 24:3 et 4), ... Dans le cadre d'une formation professionnelle d'artisans tailleurs de pierre ou poseurs, ces différentes parties de l'animation assurent une meilleure compréhension des processus de construction gothique, et donc une restauration plus efficace car s'inscrivant dans un schéma d'ensemble.

De nombreuses applications se révèlent envisageables à partir du modèle numérique de la cathédrale: comme aide aux chantiers de restauration actuels pour visualiser et tester telle ou telle option technique, pour avoir une vue d'ensemble des éléments à restaurer ou à sauvegarder, ... Pour une campagne de restauration des vitraux, on pourrait réaliser un placage d'images représentant les vitraux actuels ou une restitution des anciens, voire projeter de nouveaux cartons. Ces exemples, parmi d'autres, révèlent un grand nombre de possibilités



Figure 18. Restitution du principe d'échafaudage de la deuxième travée est de la nef au niveau des triforiums.

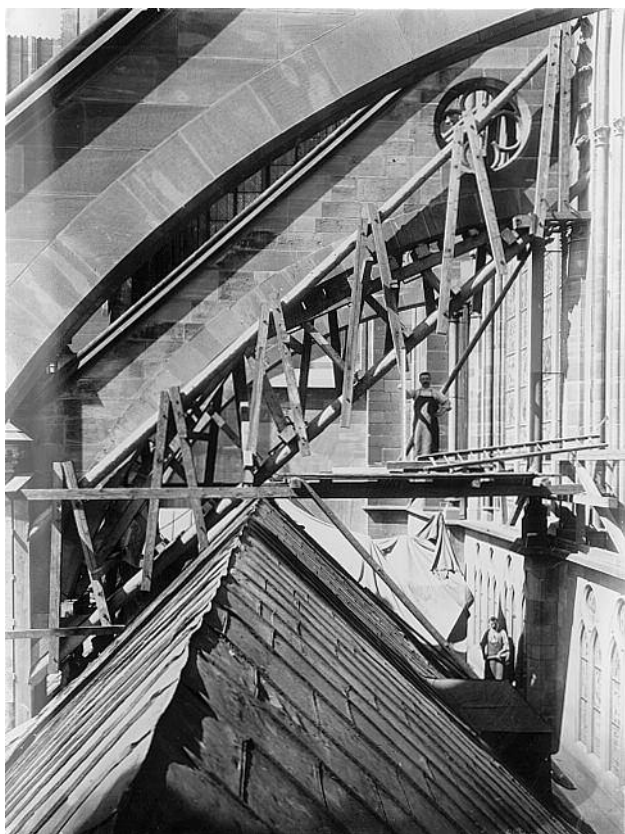


Figure 19. Photo de 1897 montrant le cintrage utilisé lors de la restauration des arcs-boutants de la nef côté sud.

d'applications une fois la modélisation effectuée, celle-ci étant évolutive donc adaptable.

### Principes de représentation

Nous venons de voir comment l'on pouvait façonner ce formidable outil technique pour l'adapter à la modélisation de la cathédrale, à condition d'en connaître les limites et de respecter une certaine éthique de la restitution.

### *Éthique de la transmission*

Les choix de représentation sont directement inspirés des principes énoncés par Riegl à la fin du XIXe concernant la restauration des monuments. Il s'en dégage une éthique de la restitution et de la transmission des hypothèses archéologiques concernant la cathédrale: il s'agit de «représenter le déroulement de la vie du bâtiment», distinguer l'original de la restauration,... par opposition à Viollet-Le-Duc: «refaire ce qui aurait dû être»; par conséquent, il ne s'agit pas de représenter un bâtiment «idéal», mais, en l'absence de toute trace ou de toute analogie possible, de rester le plus sobre et le plus rigoureux possible pour ne pas sombrer dans le spectaculaire à tout prix.

### *Restitution «dynamique»*

Dans cette optique, j'ai d'abord essayé d'utiliser des textures neutres pour différencier les traces existantes par rapport aux

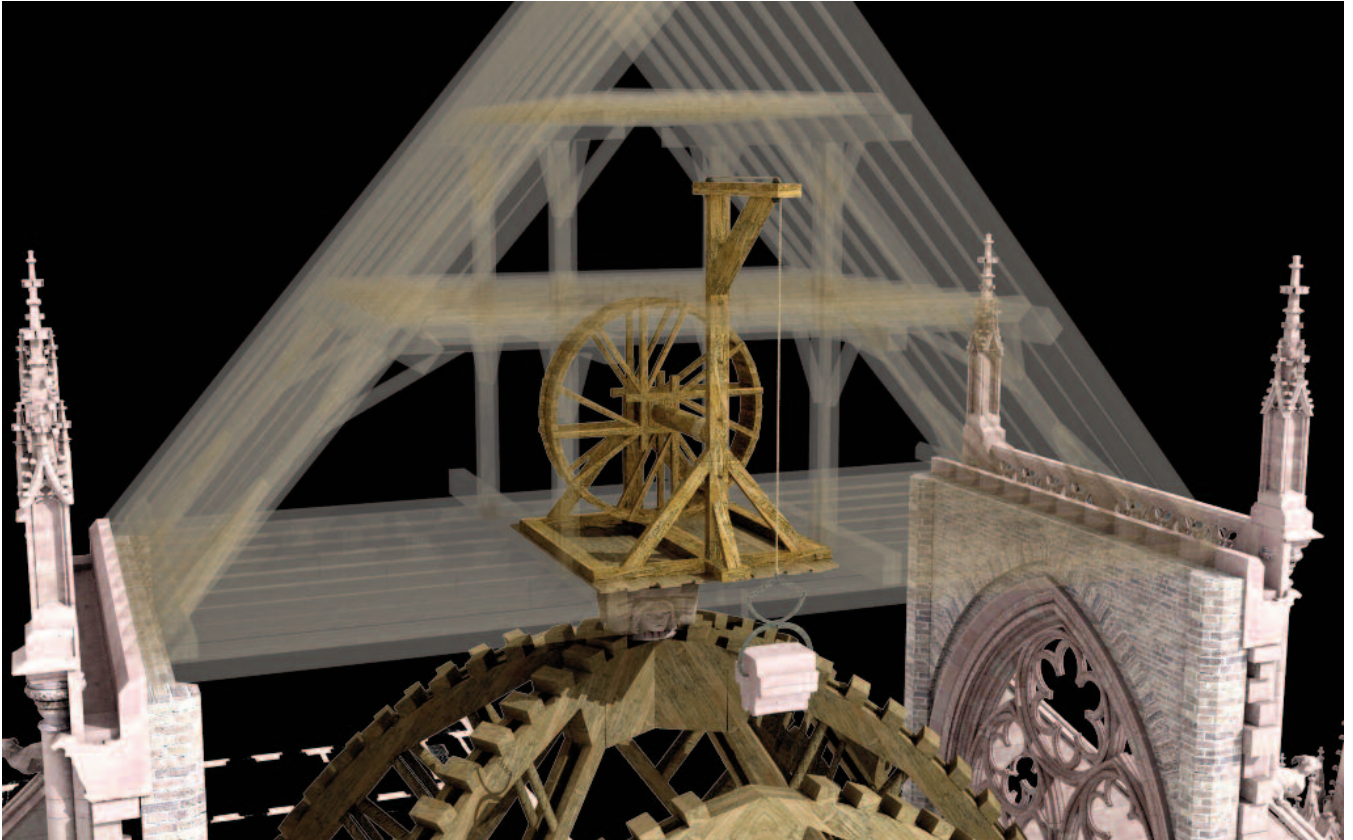


Figure 20. Restitution d'une roue d'écreuil dans la charpente du vaisseau central de la nef (2ème travée est).

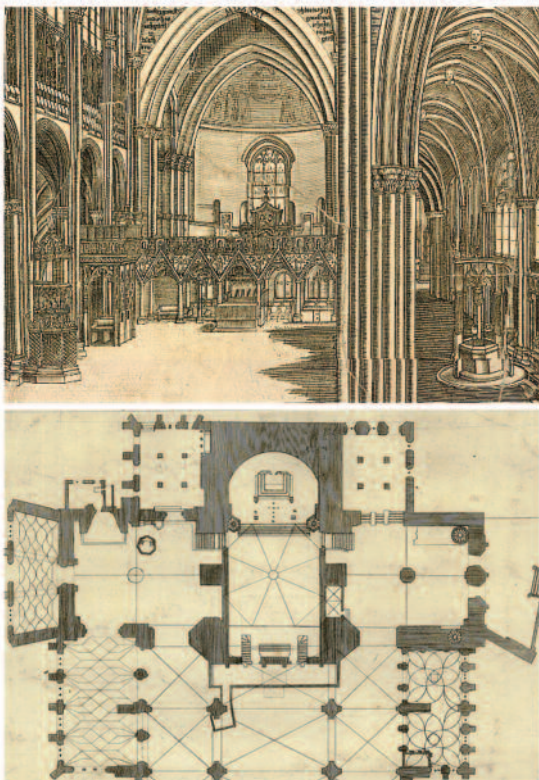


Figure 21. Gravure du jubé de la cathédrale de Strasbourg. En haut, gravure d'I. Brunn (1630); en bas, gravure anonyme du plan du chevet (avant 1682).

restitutions des parties disparues, à la manière du pointillé en dessin 2D traditionnel. L'utilisation de textures semi-transparentes, blanches, filaires, etc., dans le modèle numérique ne fonctionne pas car l'on n'a plus visuellement d'information de volumétrie. Par contre, si l'on utilise des textures planes d'appareillage, d'arcs, etc., on retrouve immédiatement l'appréhension de la profondeur dans l'image (par les orientations d'assises de pierres notamment), accentuée lors du rendu par la projection automatique des ombres portées. Pour respecter le principe d'éthique de représentation, il faut donc, dans le cas d'un support traditionnel comme une publication, montrer les différents états d'un élément restitué, des traces existantes jusqu'aux différentes hypothèses archéologiques. Mais c'est la puissance d'animation des logiciels actuels permettant de réaliser des films en 3D, qui peut, si possible, apporter des éléments de compréhension supplémentaires par rapport aux images fixes, en montrant notamment de manière fluide et didactique toute la chronologie de la restitution architecturale. C'est ce principe de restitution «dynamique» que j'ai tenté de transposer dans les animations présentées lors du colloque, en essayant de dépasser les limites du support papier.

Nous avons vu comment les méthodologies mises en œuvre dans les stratégies de modélisations influent sur la restitution architecturale (et inversement), mais quelles sont au juste les possibilités d'interaction entre outil informatique et acteurs du projet?

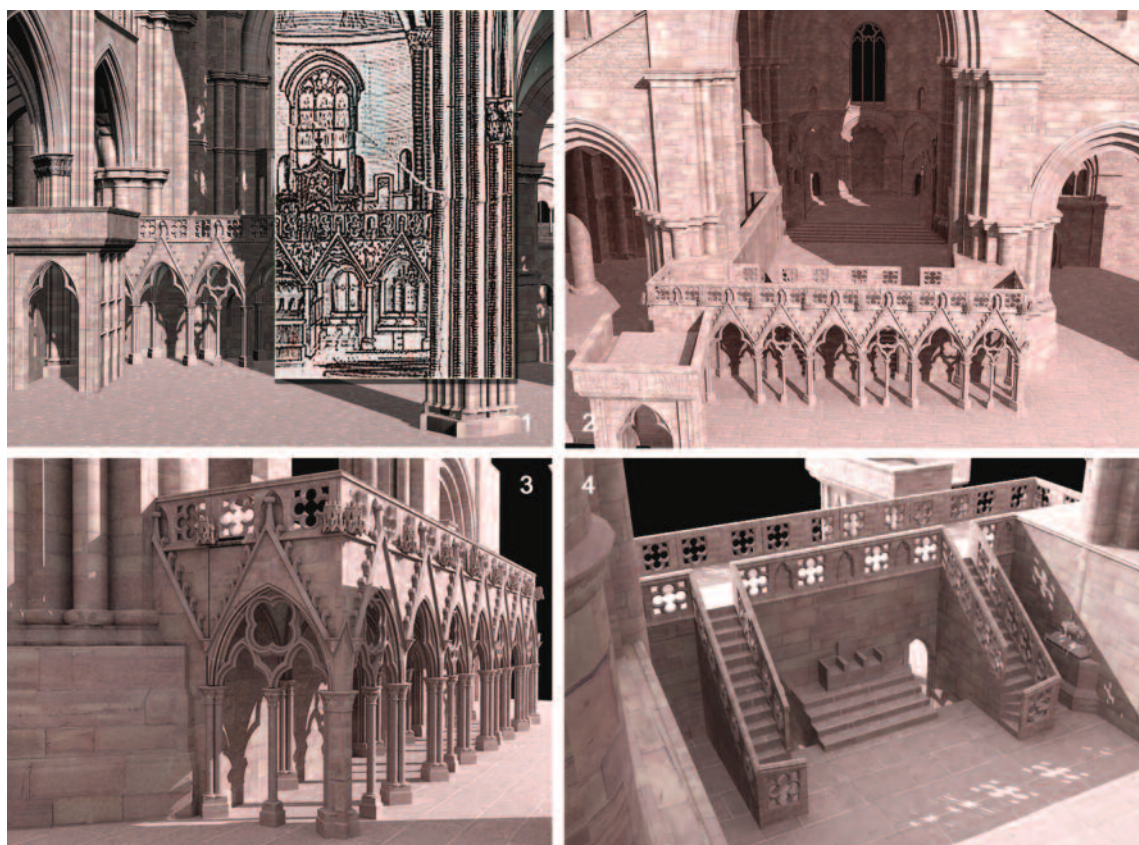


Figure 22. Restitution du jubé de la cathédrale. Etat en 1320 d'après l'étude de la topographie des autels.

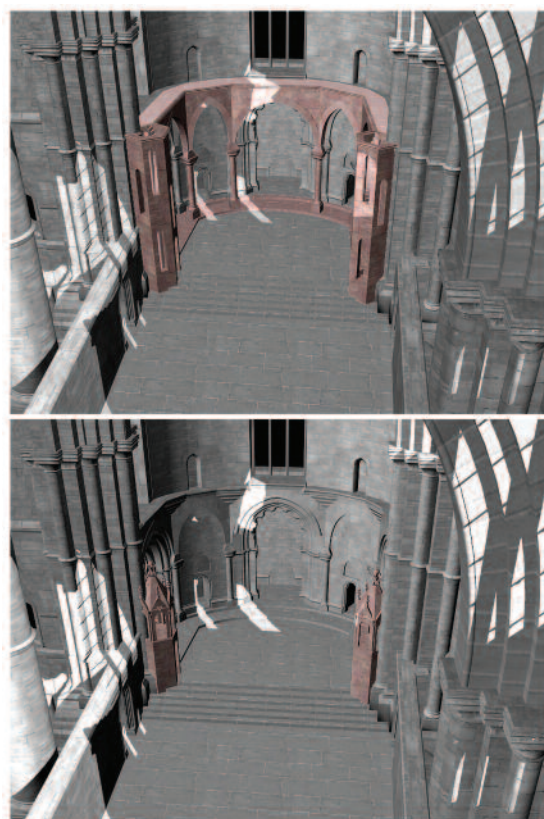
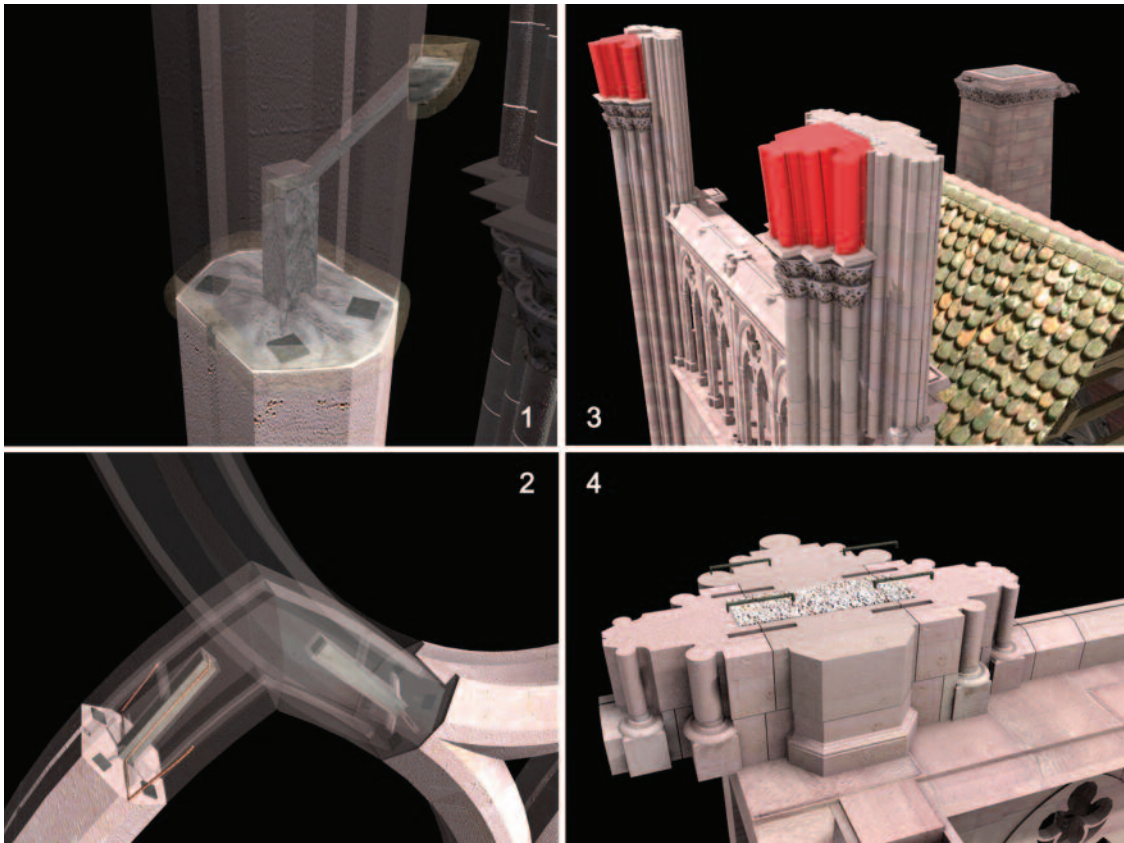


Figure 23. Hypothèses de restitution de l'aménagement de l'abside. En haut, hypothèse de Arntz; en bas, hypothèse de Reinhardt.

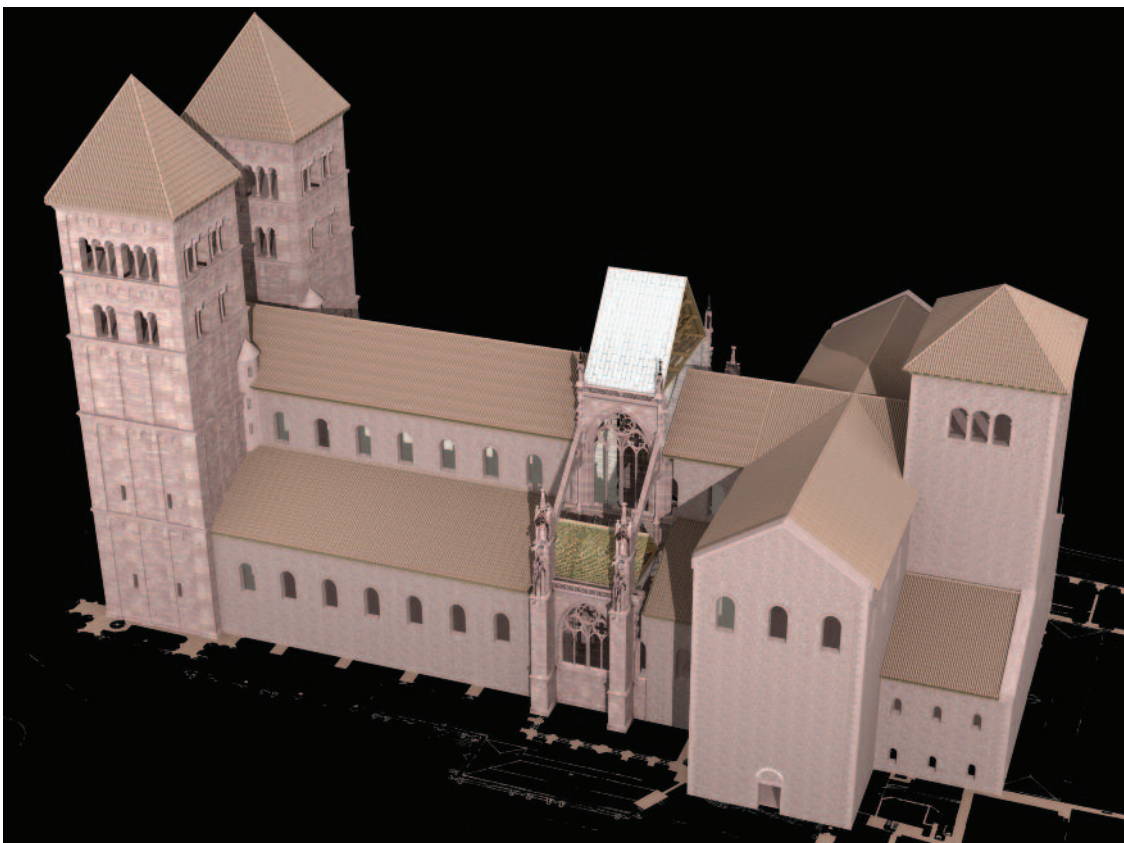
Concrètement, deux façons d'opérer se sont dégagées dans la pratique lors des restitutions. On peut, sur l'écran de l'ordinateur, au sein même du logiciel, se déplacer interactivement sous tous les angles dans des vues texturées ou en fil de fer, faire apparaître ou disparaître n'importe quel élément (grâce notamment au système de gestion chronologique et architectonique des données, évoqué plus haut); ainsi, les différents intervenants peuvent visualiser en temps réel les hypothèses de restitution, les modifier ou même en créer directement. Pour vérifier *in situ* les modélisations réalisées, on procède à une sélection de points de vue à calculer que l'on imprime sous forme papier et que l'on confronte aux traces archéologiques sur l'édifice; c'est une procédure très efficace car on dispose de vues en coupe, d'ensemble, sans premier plan, etc., permettant de décrypter plus facilement les hypothèses sur place.

Il faut insister sur le fait que, tout au long de la restitution architecturale, ne sont formulées que des hypothèses, sans jamais émettre d'affirmations non fondées: l'objectif est d'ouvrir de nouvelles pistes à explorer grâce à l'approche en trois dimensions. Si l'on perd de vue ce préliminaire, si l'on se laisse impressionner par l'aspect «nouvelle technologie» et le rendu propre de l'image, c'est là que l'image de synthèse devient un danger, la notion d'outil de représentation prenant le pas sur celui d'outil de formulation d'hypothèses. Un exemple parmi d'autres en est la figure 25, qui montre l'insertion d'une travée de la nef (1235-1250) au sein de la basilique





*Figure 24.* Restitution du montage d'une baie gothique. 1: coulage au plomb d'un goujon entre deux meneaux; 2: coulage au plomb d'un élément du réseau; 3: principe du tas de charge au niveau de la naissance des nervures de la voûte du vaisseau central de la nef; 4: système des agrafes liaisonnant les éléments d'un piédroit de la baie.



*Figure 25.* Insertion d'une travée de la nef gothique (1235-1250) dans la basilique de 1130.



**Figure 26.** Perspective sur la flèche (état 1439). Le rendu photoréaliste est atténué grâce au rendu filaire sur la gauche de l'image.

romane de 1130, pour témoigner entre autres du contraste à Strasbourg entre style roman et gothique. Cette image n'a évidemment pas de réalité archéologique, mais sortie de son contexte pour sa qualité de rendu, il pourrait en être tout autrement [13]. Pour contrecarrer cet aspect inhérent au rendu de l'image de synthèse, il faut absolument éviter de tomber dans l'écueil du photoréalisme [14] grâce notamment au fonds noir, à un éclairage particulier et à un traitement de texture adapté (fig. 26).

L'interface utilisateur du logiciel dans le cadre de la formulation d'hypothèses archéologiques permet ainsi au logiciel 3D de jouer comme outil de moyens pour la restitution. La production infographique, c'est-à-dire d'images de synthèse texturées et mises en lumière, joue, elle, comme outil de résultat pour la communication.

## Conclusion

Bien sûr, on ne peut pas prétendre tout résoudre par l'outil informatique, certains points restent «mystérieux» (mur est du bras nord du transept, chronologie de la chapelle Saint-Jean entre 1170 et 1225, départs d'arcs dans la crypte, etc.), certaines traces restent inexplicables, mais la modélisation 3D dans le cas de la cathédrale de Strasbourg a le mérite de poser de nouvelles bases pour la recherche, de provoquer de nouveaux questionnements.

---

[13] On touche ici à un problème connexe, celui de l'utilisation d'images hors contexte, ce que l'on a du mal à éviter dans le cas de publication papier ou numériques.

[14] Ce type de rendu, avec insertion de la 3D dans une photographie, est à l'inverse très recherché dans les rendus de concours d'architecture.

Crédit: toutes les photos présentées proviennent du fonds de l'Œuvre Notre-Dame. Pour les images de synthèse, © Stéphane Potier pour la fondation de l'Œuvre Notre-Dame.