

La perpendicularité de la cathédrale de Bourges, enjeu de la perfection architecturale

Andrew Tallon

Citer ce document / Cite this document :

Tallon Andrew. La perpendicularité de la cathédrale de Bourges, enjeu de la perfection architecturale. In: Bulletin Monumental, tome 174, n°4, année 2016. pp. 425-446;

doi : <https://doi.org/10.3406/bulmo.2016.12892>

https://www.persee.fr/doc/bulmo_0007-473x_2016_num_174_4_12892

Fichier pdf généré le 06/01/2020

Résumé

Les bâtisseurs de la cathédrale de Bourges ne pouvaient pas savoir précisément ce qui allait se passer au moment du décintrage des voûtes. Ils ont misé sur le fait qu'il n'y aurait pas de défaillance structurelle grâce à une conception radicalement nouvelle, et la suite leur a donné raison. Les arcs-boutants à la pente si raide ; un système sophistiqué de tirants de fer ; une armature longitudinale sous forme d'une série d'arcs de décharge présents derrière les écrans du triforium du vaisseau principal ; une attention exceptionnelle accordée aux fondations dans la majeure partie du bâtiment : tout cela constitue une matrice structurelle tridimensionnelle hautement efficace. Néanmoins, l'exploit technique, aussi brillant qu'il le soit, n'était qu'un moyen pour une fin. La cathédrale de Bourges est le fruit d'une vision sophistiquée et délicate, une vision de la perfection architecturale, exprimée en termes de perpendicularité ; une vision qui nécessita des moyens modernes et efficaces permettant de relever ce défi. Une scanographie laser entreprise à Bourges offre des signes tangibles du fait que les constructeurs de la cathédrale savaient précisément ce qu'il fallait faire pour maintenir cette vision et la porter à son sommet.

Zusammenfassung

Die Erbauer der Kathedrale von Bourges konnten nicht mit letzter Sicherheit wissen, was nach dem Entfernen der Lehrgerüste passieren würde. Sie befürchteten jedoch keine strukturellen Schäden, weil sie auf eine grundlegend neue Konzeption vertrauten und sie behielten Recht. Steile Strebebögen, ein ausgeklügeltes System von eisernen Zugankern, eine seitliche Verstärkung bestehend aus einer Reihe von in der Rückwand des Langhaustriforiums verborgenen Entlastungsbögen, und eine außergewöhnliche Sorgfalt bei der Fundamentierung des Baues : dies alles bildete eine äußerst effiziente dreidimensionale strukturelle Grundlage. Dessen ungeachtet war diese technische Glanzleistung, so bewundernswert sie auch sein mochte, eigentlich nur Mittel zum Zweck. Die Kathedrale von Bourges ist das Ergebnis einer komplexen und anspruchsvollen Vision, der Vision einer vollkommenen Architektur, deren Ausdruck Perpendikularität ist ; eine Vision, deren Voraussetzung der Einsatz von modernen und effizienten Mitteln war, mit deren Hilfe die Herausforderung gemeistert werden konnte. Ein in Bourges eingesetzter Laser-Scan zeigt anschaulich, dass die Erbauer der Kathedrale genau wussten, was zu tun war, um diese Vision zu bewahren und sie zu sublimieren.

Abstract

The builders of the cathedral of Bourges could not have anticipated precisely what would happen when the vaults were decentered, when the stones and mortar were asked, for the first time, to support themselves. They wagered against catastrophic structural failure with a radically new system, and time has proven that their trust in their intuitions was well-placed. Steeply ramped flying buttresses ; a sophisticated system of iron ties ; a longitudinal armature of relieving arches hidden behind the triforium screens ; unusual attention given to foundation construction in the majority of the building : these are the constituent elements of a highly efficient, three-dimensional structural matrix. Yet these techniques, brilliant though they be, were but a means to an end. The cathedral of Bourges is the fruit of a highly sophisticated and delicate aesthetic vision, a vision of architectural perfection expressed in terms of perpendicularity, which required commensurately modern and efficient means to prevail. A laser scan undertaken at Bourges supplies compelling evidence that the builders of the cathedral knew precisely what to do to maintain the strength of this vision.

LA PERPENDICULARITÉ DE LA CATHÉDRALE DE BOURGES, ENJEU DE LA PERFECTION ARCHITECTURALE

Andrew TALLON *

William Henry Goodyear, premier conservateur du musée des Beaux-Arts de Brooklyn et fils de l'inventeur du procédé de vulcanisation, affirmait en 1904 que « la maçonnerie [gothique] n'est ni mastic ni caoutchouc »¹. La maçonnerie, après tout, pensait-il, pouvait difficilement se déplacer une fois le bâtiment assemblé. Pourtant les édifices gothiques étaient (et dans une certaine mesure sont encore) dans un état de perpétuel mouvement. Motivés par un désir de créer un nouveau type d'espace avec un matériau de construction incorporel – la lumière – les constructeurs gothiques ont réduit la taille des éléments structuraux au strict minimum. Le moment de vérité arrivait avec la suppression du cintrage : les poussées des voûtes et des arches exigeaient une réponse, et le bâtiment soit tenait bon comme prévu ou, plus souvent, s'adaptait en se déformant. C'était la plasticité inhérente du mortier, qui pouvait prendre des mois à durcir, qui permettait cette réponse dynamique aux forces de poussées.

Le degré à partir duquel le bâtiment n'est plus d'aplomb peut aujourd'hui être « lu » et documenté, avec une étonnante précision, grâce à un scanner laser. En émettant un rayon laser qui balaye l'espace à 360 degrés horizontalement et 270 degrés verticalement grâce à un miroir tournant, le scanner mesure la distance entre lui-même et toutes les surfaces rencontrées des milliers de fois par

seconde². Les mesures obtenues forment ce que l'on appelle un « nuage » de points, dont chacun est précis à quelques millimètres près. Si un seul nuage donne beaucoup d'informations, il est nécessaire, pour avoir une couverture suffisante dans un grand espace comme la cathédrale de Bourges, de numériser depuis de nombreux endroits. Une fois assemblés dans un logiciel, ces nuages peuvent être ensuite sectionnés pour réaliser des coupes et des plans. Des mesures peuvent également être prises à partir de n'importe quel point vers un autre, ou vers un plan de référence, équivalant numérique du fil à plomb³.

Plongeons maintenant, grâce à cette nouvelle technologie, dans l'univers microscopique de la cathédrale⁴. Une image vaut mille mots, dit-on en anglais, nous allons donc leur laisser la place pour nous conter les grandes lignes de l'histoire structurelle du bâtiment. Commençons avec l'élévation intérieure du côté nord (fig. 1). Les quatre lignes rouges sont des repères de hauteur placés arbitrairement au niveau des retombées des voûtes, à l'appui du triforium, au niveau des chapiteaux des arcades et au niveau du sol ; elles rendent possibles quelques observations générales sur la régularité de la construction du bâtiment. Le niveau le plus constant est celui des retombées des voûtes sur les chapiteaux hauts, il ne varie que de quelques centimètres. Celui de l'appui du triforium baisse doucement en allant vers l'ouest. Celui des chapiteaux

des arcades est le moins régulier : il varie de l'ordre de dix centimètres. Dans chaque cas, alors que nous avançons vers les parties occidentales du bâtiment, l'amplitude du changement augmente. À l'ouest seulement il est possible d'associer une baisse du niveau de la superstructure avec une baisse du niveau du sol : nous sommes ici en présence de la marque du tassement différentiel en partie responsable de l'effondrement de la tour nord en 1506⁵. Nous y reviendrons.

Côté sud, à l'est (fig. 2), nous remarquons immédiatement que le niveau du triforium chute, comme si le bâtiment s'était affaissé juste à l'ouest de l'hémicycle. Mais cette « chute » n'existe qu'à ce niveau, il semble alors raisonnable de l'attribuer aux tâtonnements de la première phase de construction du chœur. Les chapiteaux hauts restent de niveau, contrairement au triforium et aux chapiteaux des arcades. La dénivellation observée au niveau du sol dans les travées les plus à l'ouest du côté nord est également manifeste au sud, mais à moindre degré.

Regardons de plus près le comportement structurel de l'extrémité est du bâtiment et commençons par une vue inhabituelle, une coupe à travers les travées du déambulatoire (fig. 3, correspondant à la coupe n° 2 de la fig. 4), à partir de laquelle nous pouvons comprendre simplement que cette partie du bâtiment est restée d'aplomb dans l'axe nord-sud. Si l'on examine maintenant le bâtiment dans

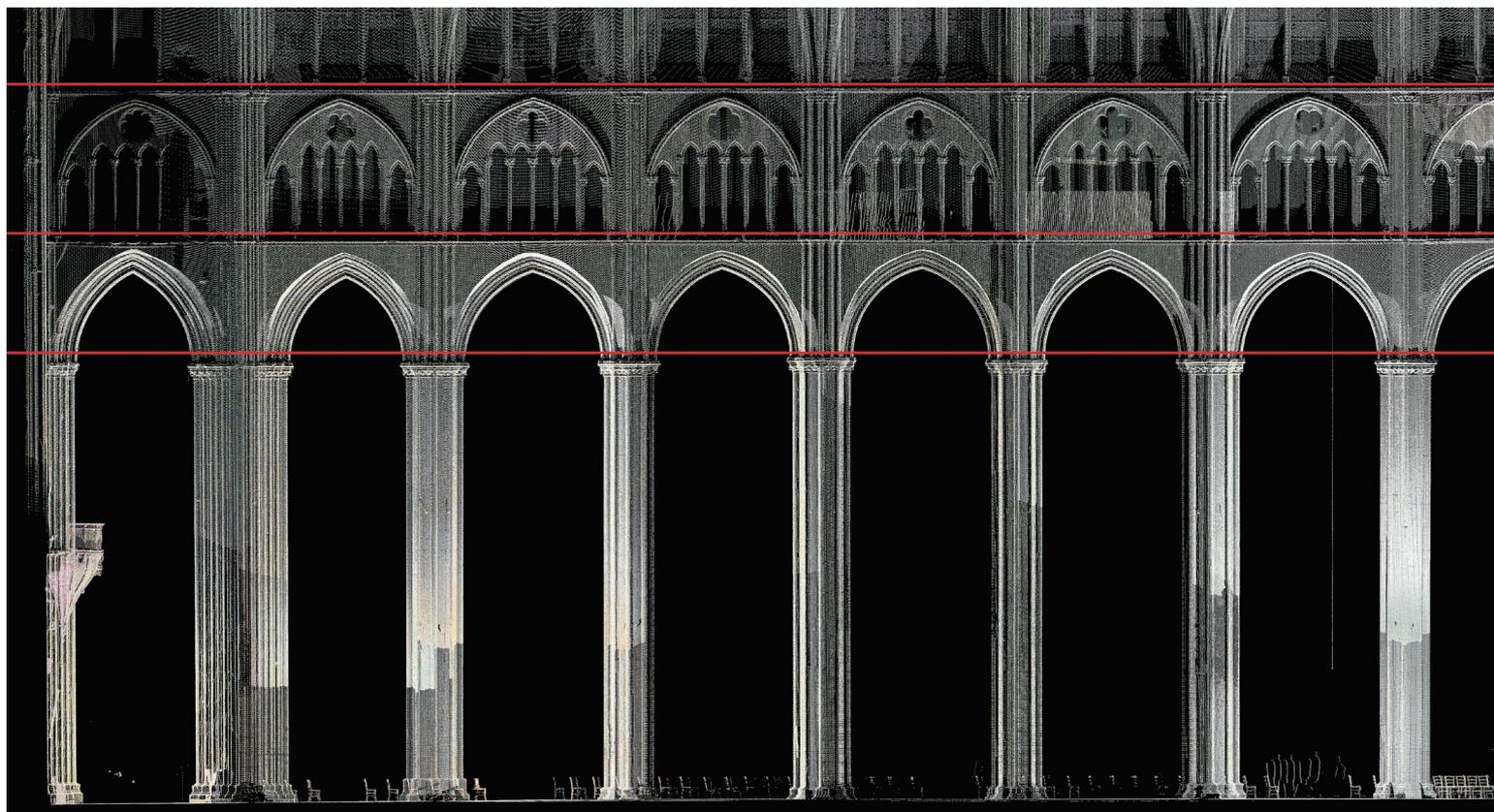
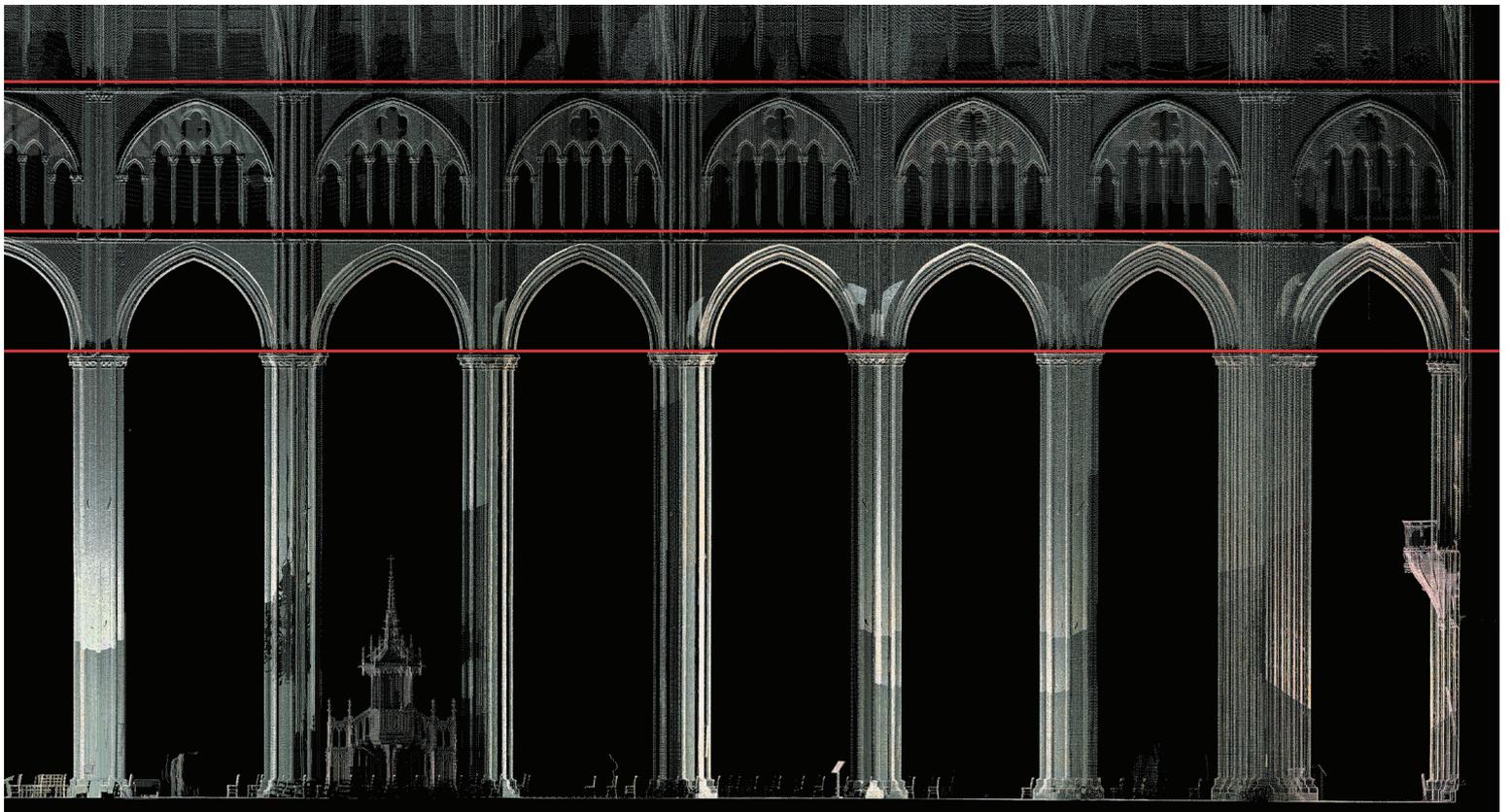
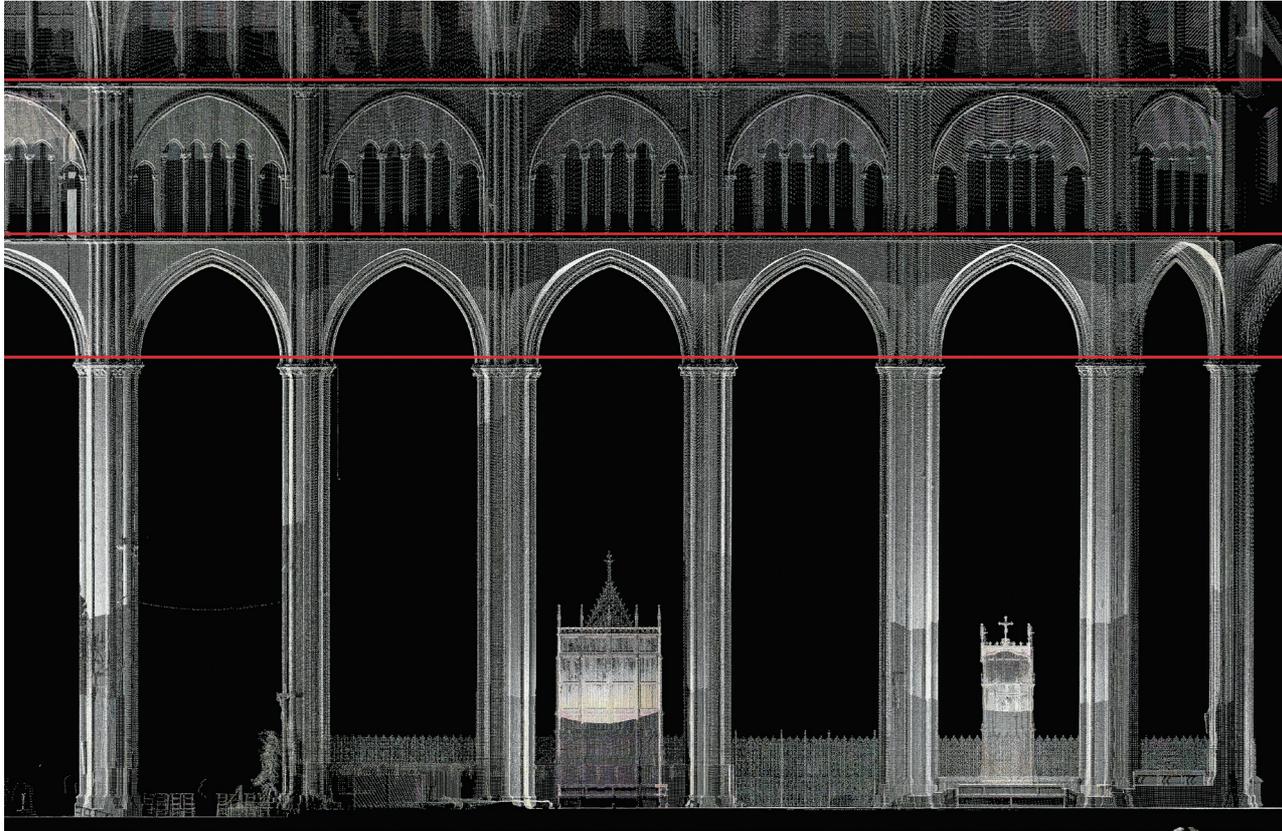


Fig. 1 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe longitudinale, élévation nord du vaisseau central.



Fig. 2 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe longitudinale, élévation sud du vaisseau central.



l'axe est-ouest, nous voyons sur le côté sud que les premiers piliers se sont déplacés hors d'aplomb et penchent légèrement vers l'est (fig. 5). L'explication est simple. Les travées droites se soutiennent les unes les autres parfaitement dans l'axe longitudinal ; les forces de même amplitude s'annulent mutuellement. L'hémicycle doit alors fournir le même support à la travée droite la plus à l'est. Bien que la structure des absides incurvées soit intrinsèquement stable dans un sens macroscopique, elle ne l'est pas dans un sens microscopique ou local ; sa courbure même n'est pas idéalement adaptée à cette fonction de stabilisation. La poussée de l'arcade et de la voûte de la travée droite se propage dans le réseau complexe des voûtes du déambulatoire et comprime

la maçonnerie jusqu'à ce qu'elle trouve le repos. C'est ainsi que les voûtes, les arches et les piliers ont pu effectuer ce mouvement vers l'est.

Un chaînage métallique a été installé à la base des arcades du triforium intérieur, et il semble que ce soit en réponse à ce problème. Même s'il est difficile de savoir dans quelle mesure cette chaîne a effectivement contenu ce mouvement en ce point sensible du bâtiment, elle fournit néanmoins un indice précieux sur la réflexion menée par le constructeur du chevet. La chaîne n'a pas été prévue dès le début de la construction, ainsi que le montre son mode d'installation : elle a été placée sur la surface de l'appui du triforium dans les travées tournantes,

mais encastree dans la maçonnerie des travées droites ⁶. Le maître du chevet avait dû observer, à l'aide du fil à plomb, le mouvement manifeste dans la figure 5, et s'inquiéter suffisamment pour avoir disposé cette chaîne en réponse.

La chaîne était également destinée à empêcher un déplacement longitudinal du bâtiment en cours de construction ⁷. Un tel déplacement était un risque important : les travées adjacentes annulaient mutuellement leurs poussées, mais qu'y avait-il pour résister à la poussée longitudinale de la dernière travée voûtée ? De grands étais de bois auraient été indispensables, d'autant plus que, comme l'ingénieur Robert Mark l'a démontré, la force longitudinale d'une voûte sexpartite

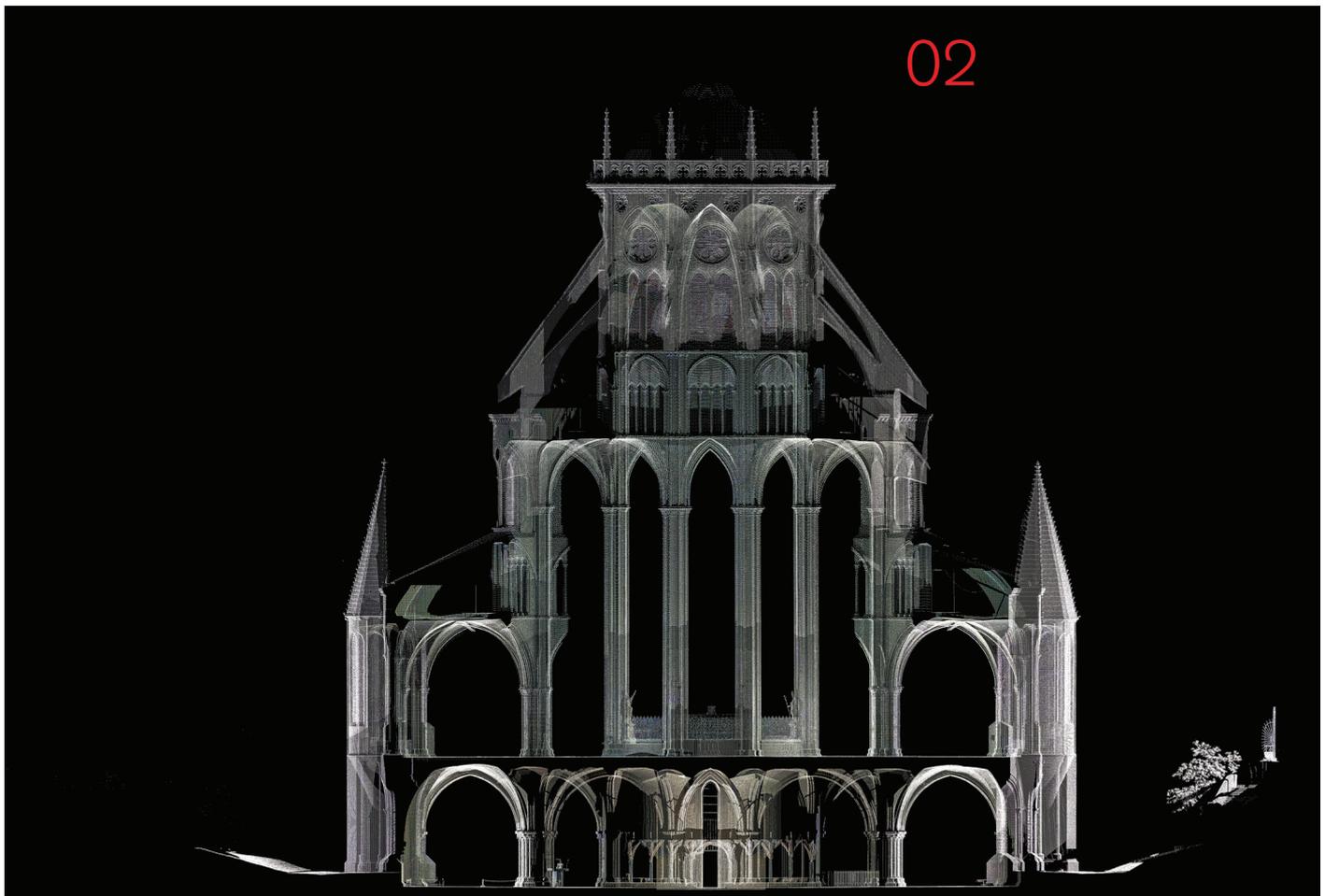


Fig. 3 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur le déambulatoire (n° 2).

est nettement supérieure à celle générée par une voûte quadripartite de taille équivalente⁸. La chaîne de fer était alors un moyen astucieux de présenter, au sein même de la structure, une résistance à la poussée des travées.

C'est dans l'axe transversal que le travail structurel du bâtiment est le plus apparent. La poussée vers l'extérieur d'une voûte sexpartite à ses retombées a été estimée par William Taylor et Robert Mark à quatorze tonnes ; chaque pilier temps fort (celui qui reçoit un doubleau ainsi que les nervures) reçoit donc pleinement vingt-huit tonnes de poussée, qui doivent être conduites sans faute, à travers un système de contrebutement, jusqu'aux fondations⁹.

La figure 6 (coupe n° 3) montre le premier ensemble des piles des travées droites. Sont présentées dans le tableau en haut à droite les mesures de la déviation de l'aplomb en six points clés du bâtiment ; un ensemble de lignes, fils à plomb virtuels, en rouge, fournit des points de référence arbitraires pour donner un sens visuel à ces mesures. Les valeurs négatives signifient que le pilier se déplace vers l'extérieur, vers les contreforts ; les valeurs positives indiquent que le pilier se déplace dans le vide du vaisseau central. Le tableau est à lire de la façon suivante : au niveau des chapiteaux hauts du bas-côté intérieur, côté nord, le pilier penche vers l'extérieur de 4 cm ; de l'autre côté, le pilier reste pratiquement d'aplomb. Dans le vaisseau central, au niveau des chapiteaux des arcades, côté nord, le grand pilier penche vers l'intérieur de 2 cm ; côté sud, il penche vers l'intérieur de 7 cm. Enfin, au niveau des chapiteaux hauts du vaisseau central, côté nord, le pilier penche vers l'intérieur de 2 cm ; côté sud, il penche vers l'intérieur de 4 cm. Une première observation est possible : les arcs-boutants font très bien leur travail. Ce que nous voyons ici et verrons ensuite est la preuve d'un véritable exploit : jamais auparavant la construction d'un bâtiment voûté avec des piles si allongées et des arcs-boutants si fins n'avait été tentée – et réussie¹⁰.

La travée suivante (fig. 7 : coupe n° 4) comporte l'escalier Saint-Guillaume, côté

sud ; comme en témoignent les mesures, le bâtiment a une fois de plus très peu bougé. Pourtant, cette paire de piliers et celle qui la précédait sont inhabituelles : l'une est rattachée à l'hémicycle, l'autre à une tour massive lui servant de contrefort. Dans la coupe n° 5 (fig. 8), nous voyons une tendance de déformation plus caractéristique qui peut être expliquée par la séquence de construction. Si l'on regarde de plus près le côté sud, on remarque que toute la superstructure semble s'être déplacée vers l'intérieur. Il s'agit de déformations progressives, semblables à celles des parties hautes de la tour de Pise ou, pour prendre un exemple plus proche, à celles de la tour de l'abbatiale de Saint-Martin d'Étampes, corrigées alors que le bâtiment était en cours de construction. Contrairement à ces deux exemples toutefois, dont les mouvements ont été provoqués par des tassements du sol, la déformation ici a été produite par la poussée des voûtes des bas-côtés intérieurs. Les constructeurs ont érigé le mur extérieur, le bas-côté extérieur et les grands piliers, puis ont voûté le bas-côté intérieur¹¹. Au sud, la volée la plus basse du système boutant a maintenu les voûtes des bas-côtés bien en place, même si le support a été placé un peu trop haut : le pilier s'est déformé vers l'extérieur juste en dessous. À l'intérieur, sans rien pour l'arrêter, le grand pilier s'est déplacé dans le vide.

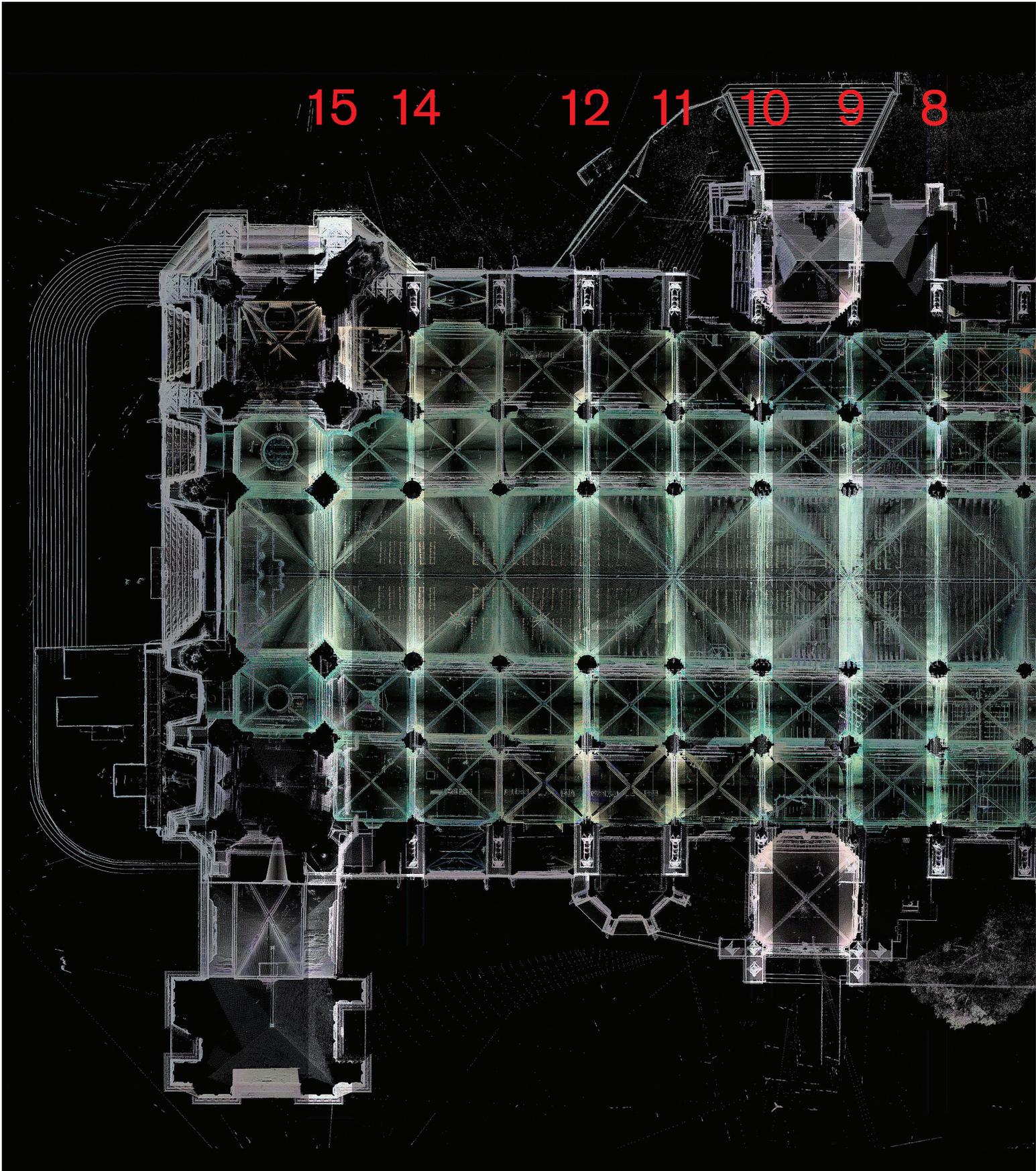
Comme pour la chaîne de l'hémicycle, les constructeurs ont apparemment vu ce qui se passait, et ont tenté des expériences dans le but de maîtriser ces poussées. Comme Maxime L'Héritier *et al.* le montrent, ils ont installé des tirants de fer, en commençant sur le côté sud du chevet, sur le dos des murs diaphragmes qui surplombent les doubleaux du bas-côté intérieur (fig. 9)¹². Chaque tirant a été ancré dans le mur du triforium au droit du pilier et dans la maçonnerie de la culée correspondante, et s'est montré efficace – à en juger par les déformations constatées – pour arrêter les poussées des voûtes¹³. Ces tirants auraient en fait fonctionné encore mieux s'ils avaient été placés au niveau des chapiteaux, là où ils sont généralement dans les églises gothiques italiennes

par exemple. Mais cela a pu être jugé inesthétique et la meilleure alternative était alors de les placer juste au-dessus des voûtes. Au-dessus de ce niveau, comme le démontre le scanner, l'aplomb a été rétabli et la construction a continué.

La déformation côté nord de l'édifice suit un schéma plus typique des déformations gothiques (fig. 10) : celui d'une courbe en S produite par les poussées opposées des voûtes des bas-côtés et des voûtes principales. Dans la section suivante, n° 7, par contre, nous commençons à voir sur le côté nord une déformation parallèle de la superstructure et des contreforts extérieurs probablement due à des fondations insuffisantes sous ces derniers. Cet effet est plus aisément visible dans la section n° 8 (fig. 11). Les chiffres du côté nord indiquent que toute la superstructure s'est déplacée vers l'extérieur ; l'origine du problème est révélée par un fil à plomb virtuel placé à côté du contrefort extérieur de l'arc-boutant. Ce dernier a subi les poussées des voûtes et a pivoté sur ses fondations vers l'extérieur.

De nouveaux arcs-boutants plus grands, placés légèrement plus haut sur le mur gouttereau, sont introduits à l'emplacement de la coupe n° 9 (fig. 12) ; nous sommes maintenant de l'autre côté de la « coupure Branner », la suture qui marque la pause du chantier entre le chœur et la nef. Comme Robert Mark l'a noté en 1982, et comme la numérisation laser le confirme, le chevet s'était déjà montré stable, maintenu en place par une série d'arcs-boutants minces mais très efficaces¹⁴. Alors pourquoi cette conception manifestement réussie a-t-elle été modifiée ? Il est possible, comme Mark l'a suggéré, que le constructeur responsable de la nef (ou, tout aussi bien, l'évêque et le chapitre qui suivaient le chantier du sol) ait été intimidé par l'extraordinaire légèreté du chevet et désirait se rassurer (visuellement).

À l'ouest de la coupure, le côté sud commence lui aussi à adopter le mode de déformation classique en S ; cependant, il a à peine bougé. Contrairement au côté sud du chœur qui s'est déplacé avant la



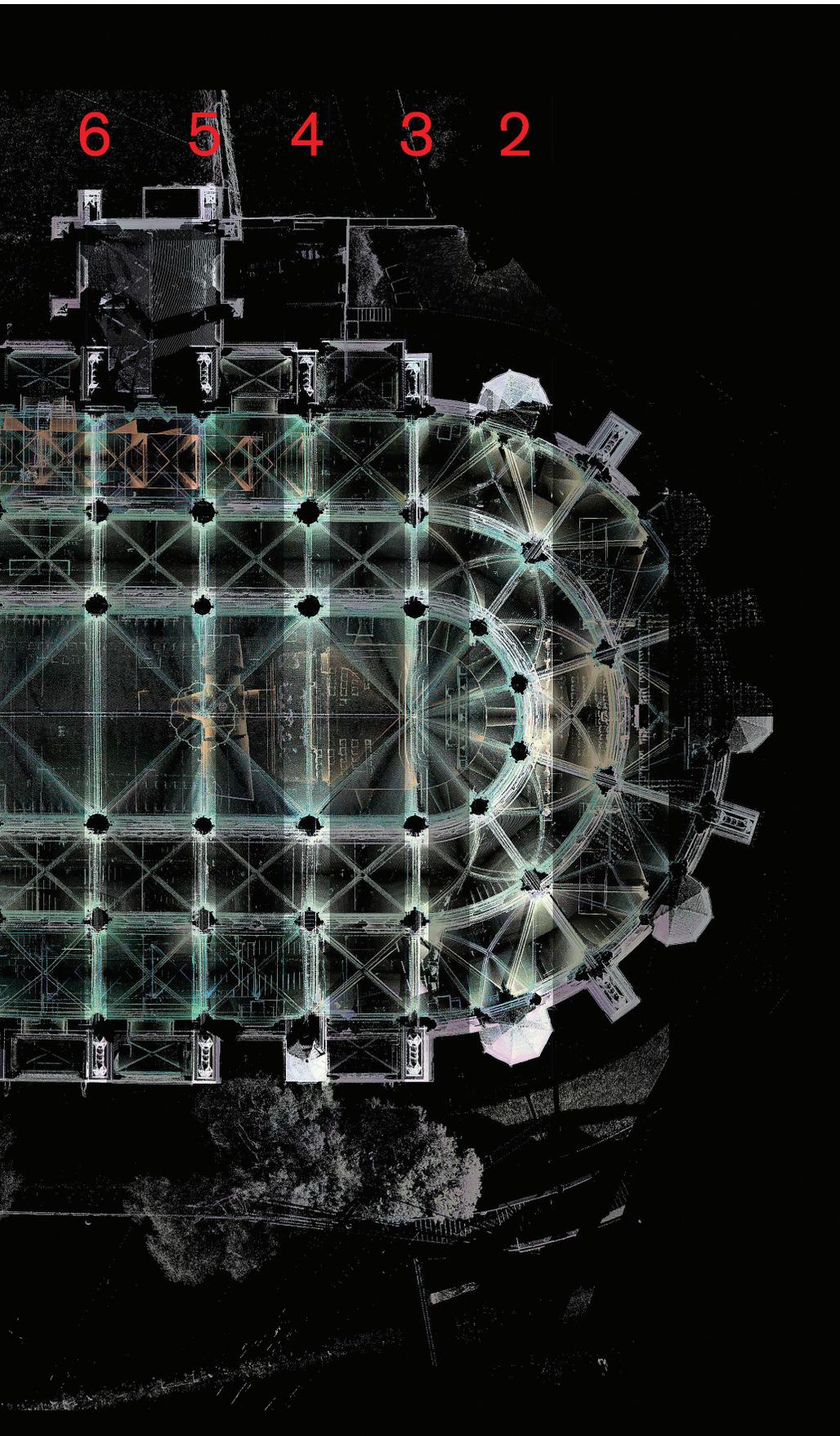


Fig. 4 - Bourges, cathédrale, relevé laser, plan indiquant l'emplacement des coupes.



Fig. 5 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe longitudinale sur le chevet, côté sud.

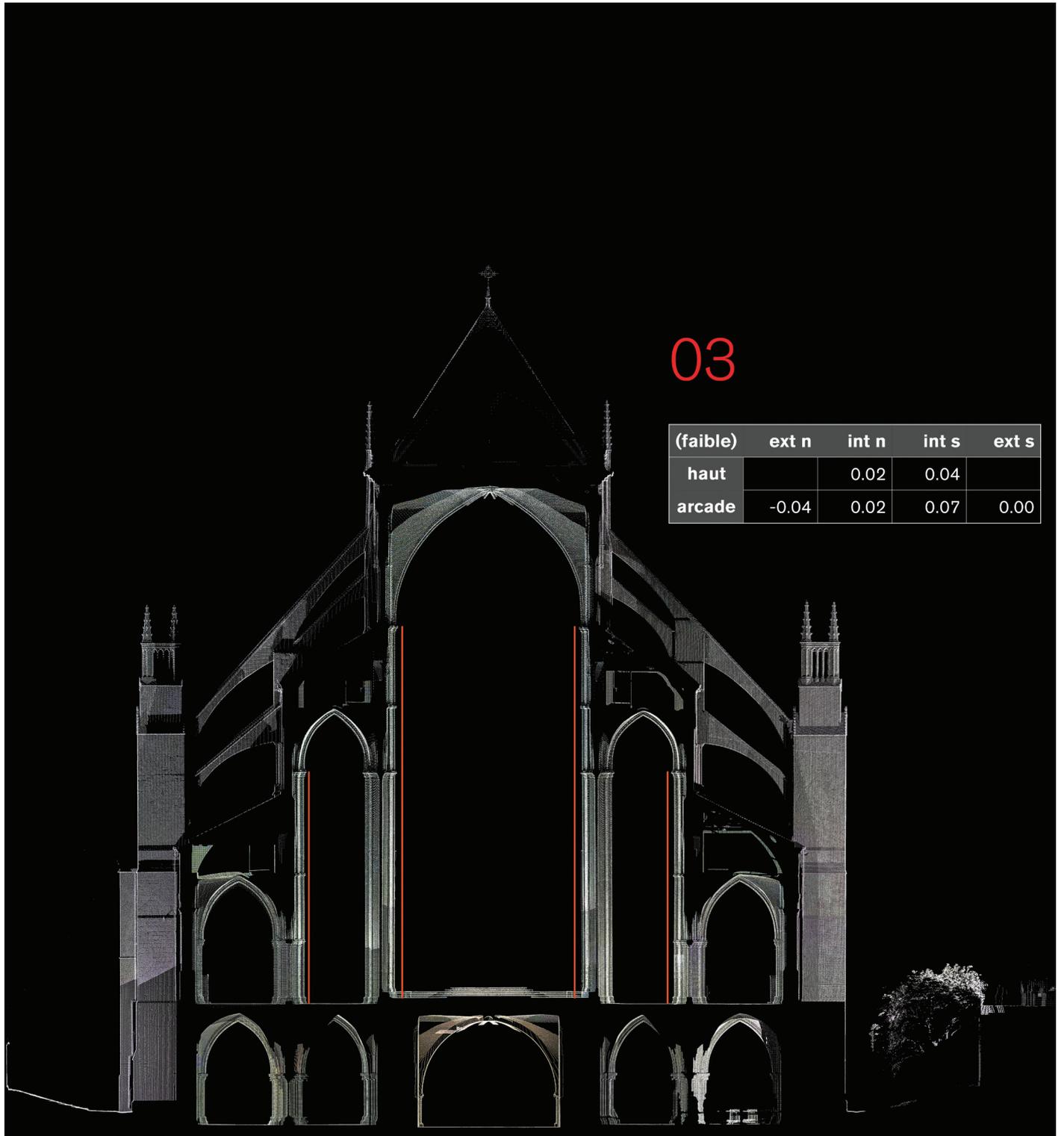


Fig. 6 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur le chevet (n° 3).

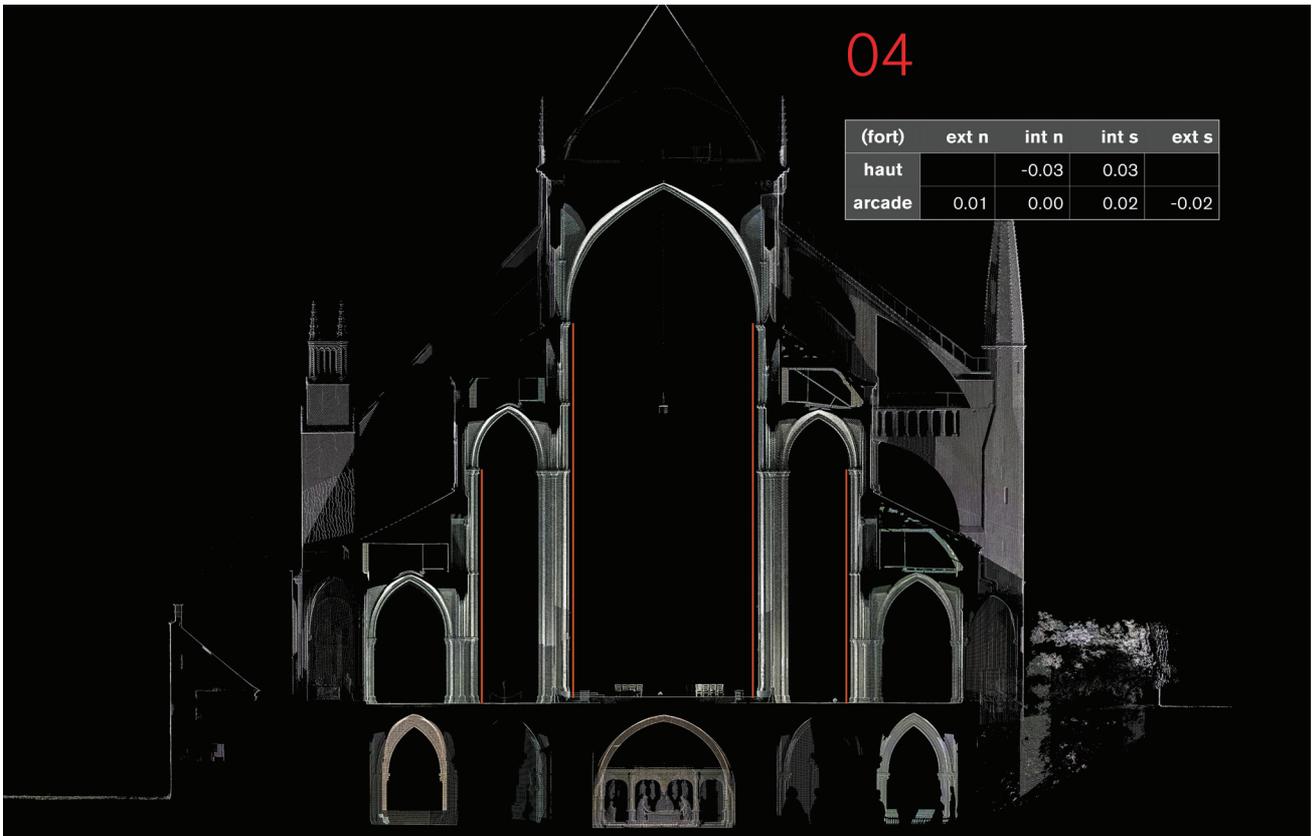


Fig. 7 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur le chevet (n° 4).

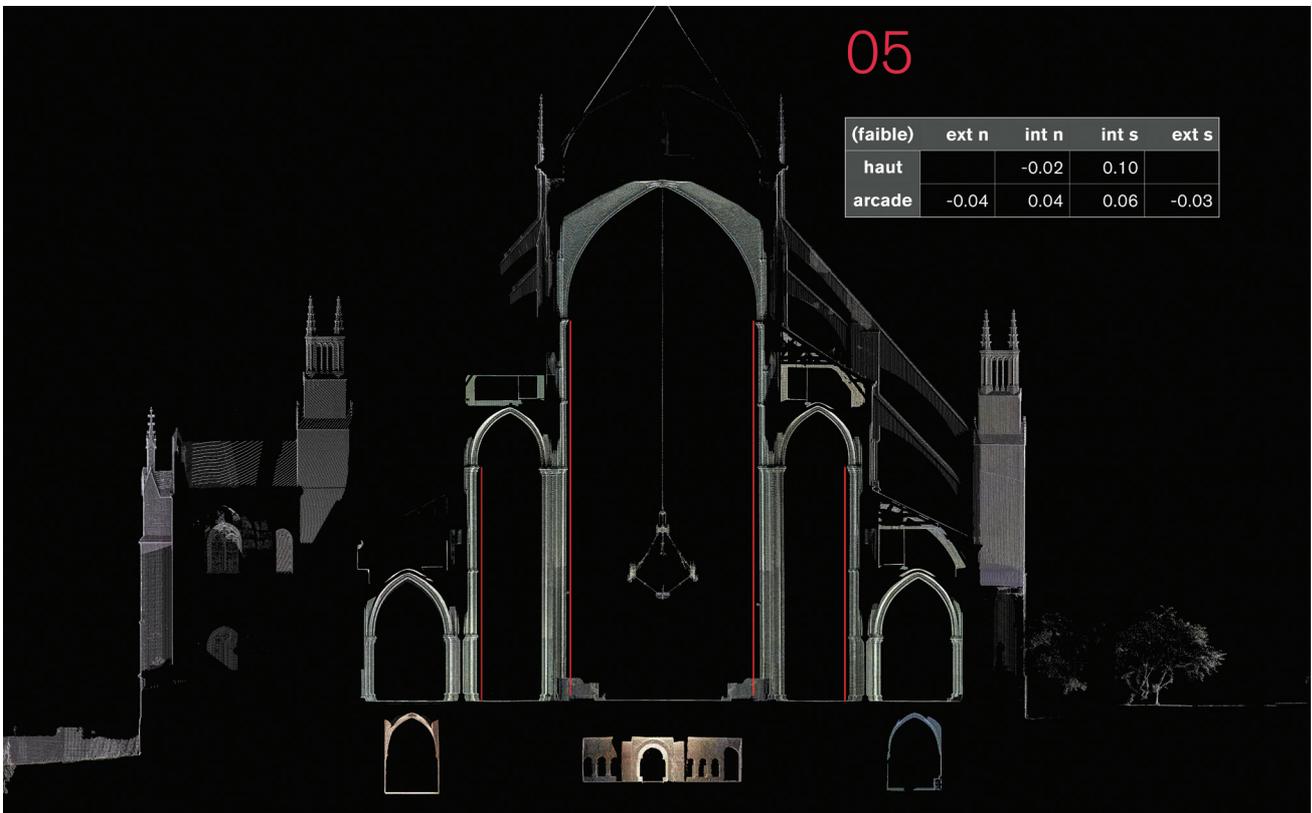


Fig. 8 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur le chevet (n° 5).

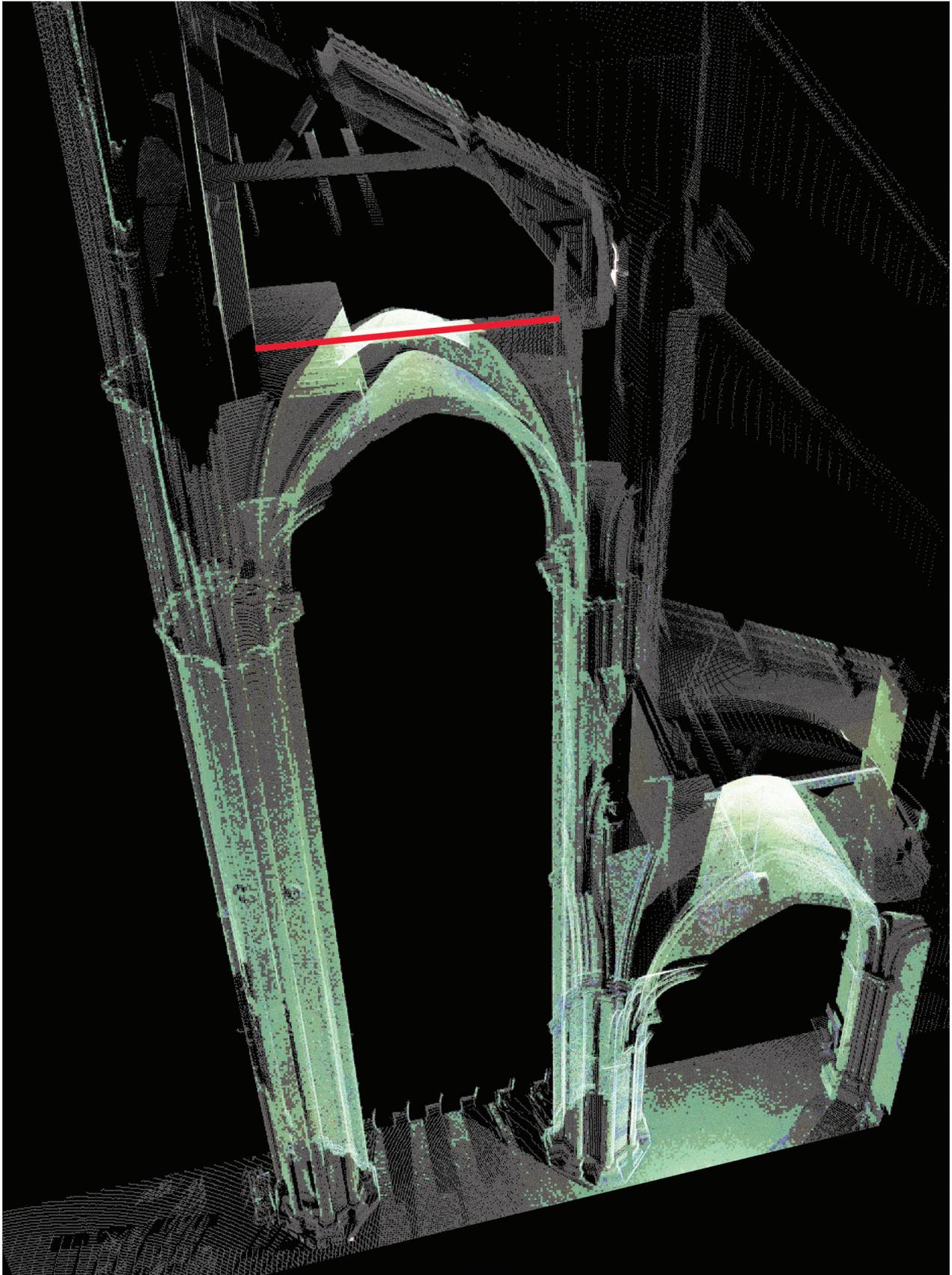


Fig. 9 - Bourges, cathédrale, relevé laser, vue axonométrique montrant la position des tirants en fer.



Fig. 10 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur le chœur (n° 6).

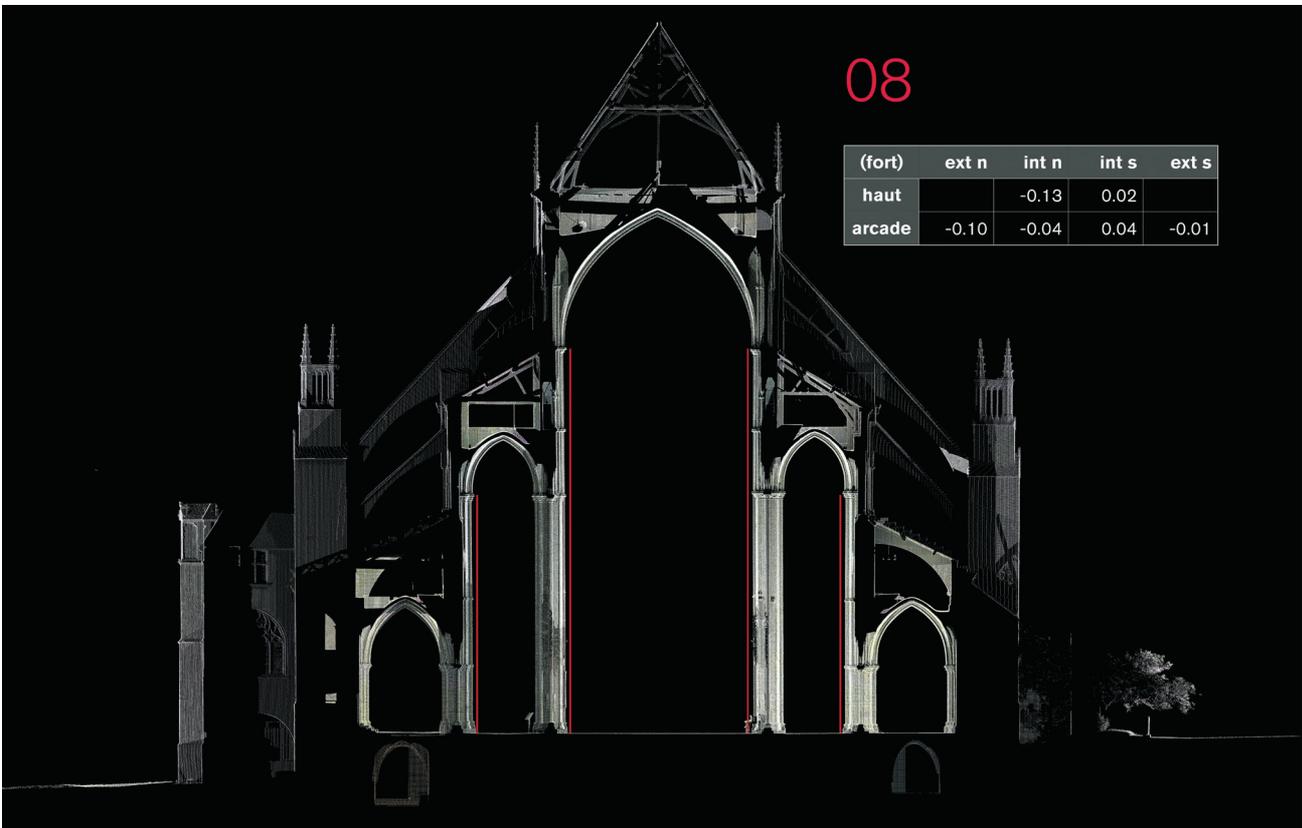


Fig. 11 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale (n° 8).

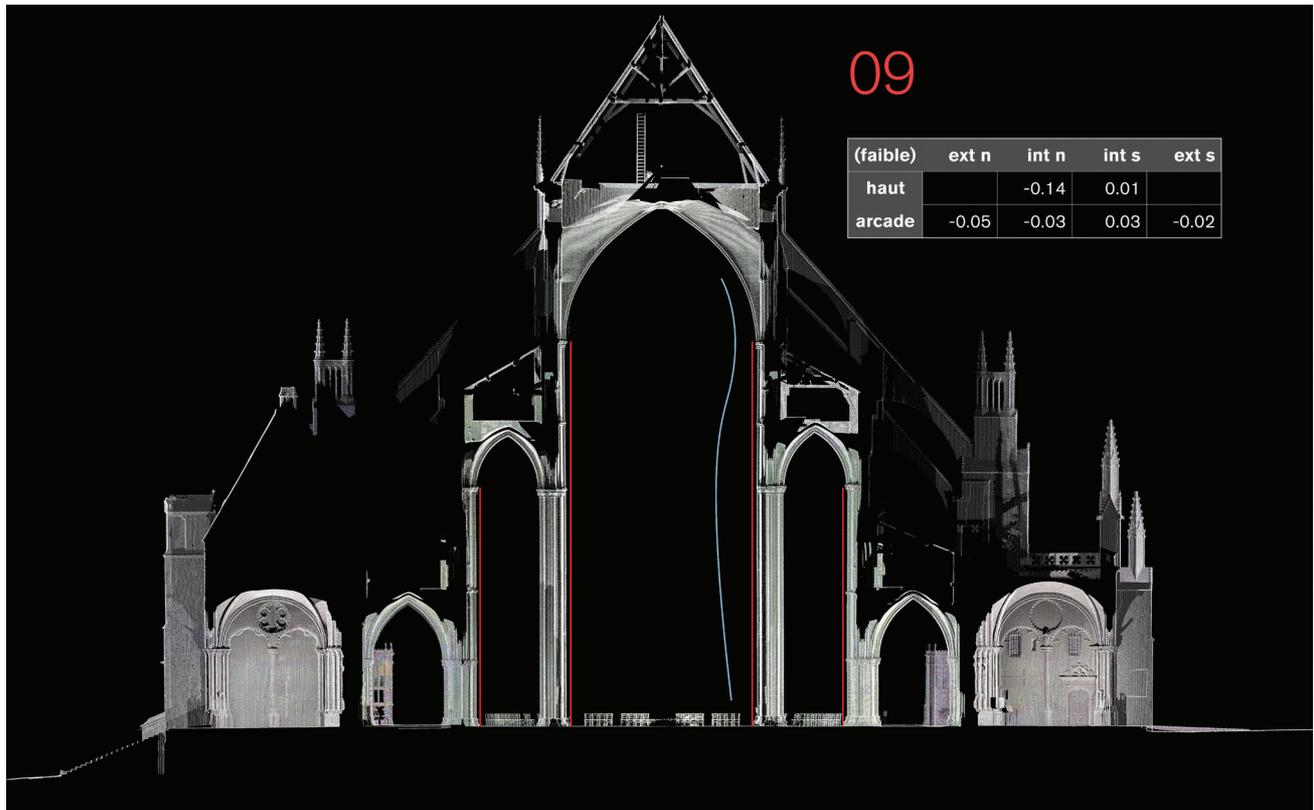


Fig. 12 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale (n° 9).

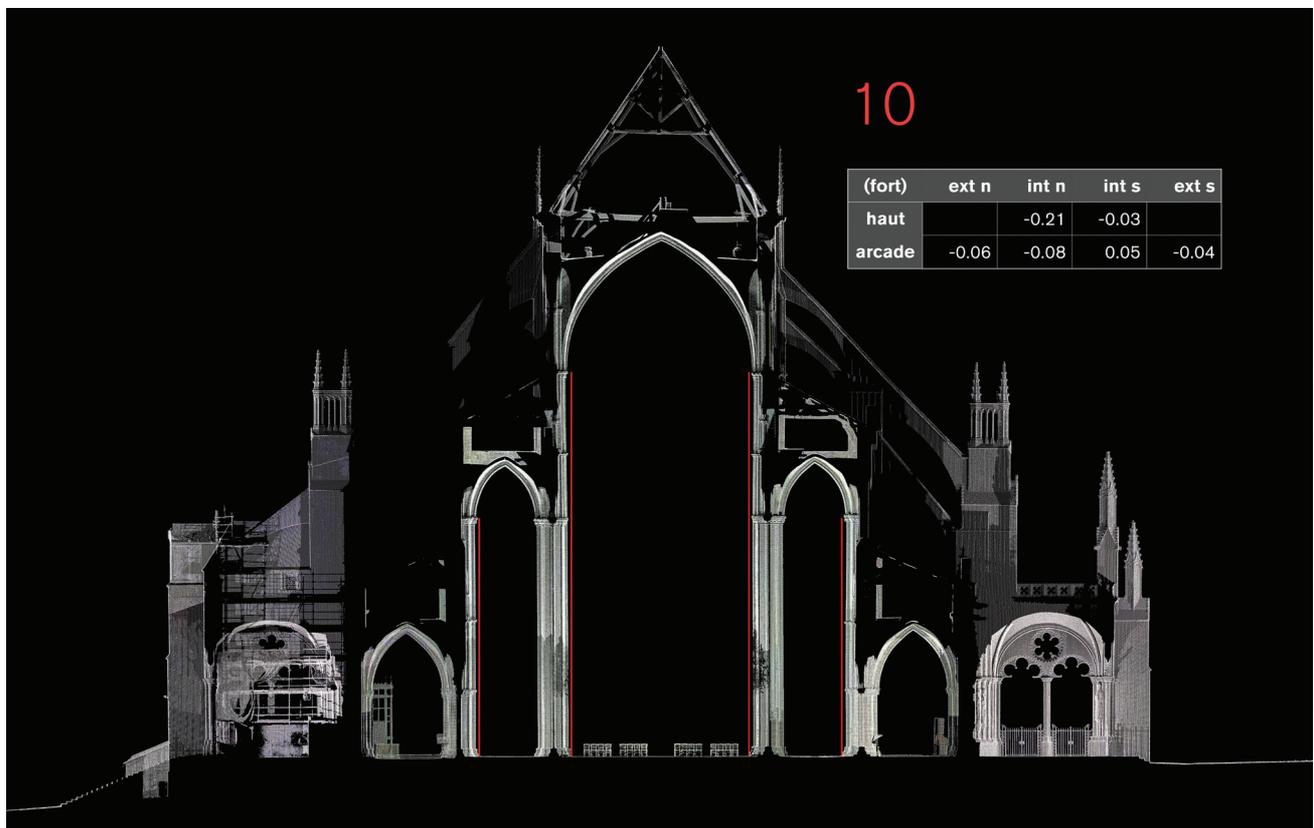


Fig. 13 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur la nef (n° 10).

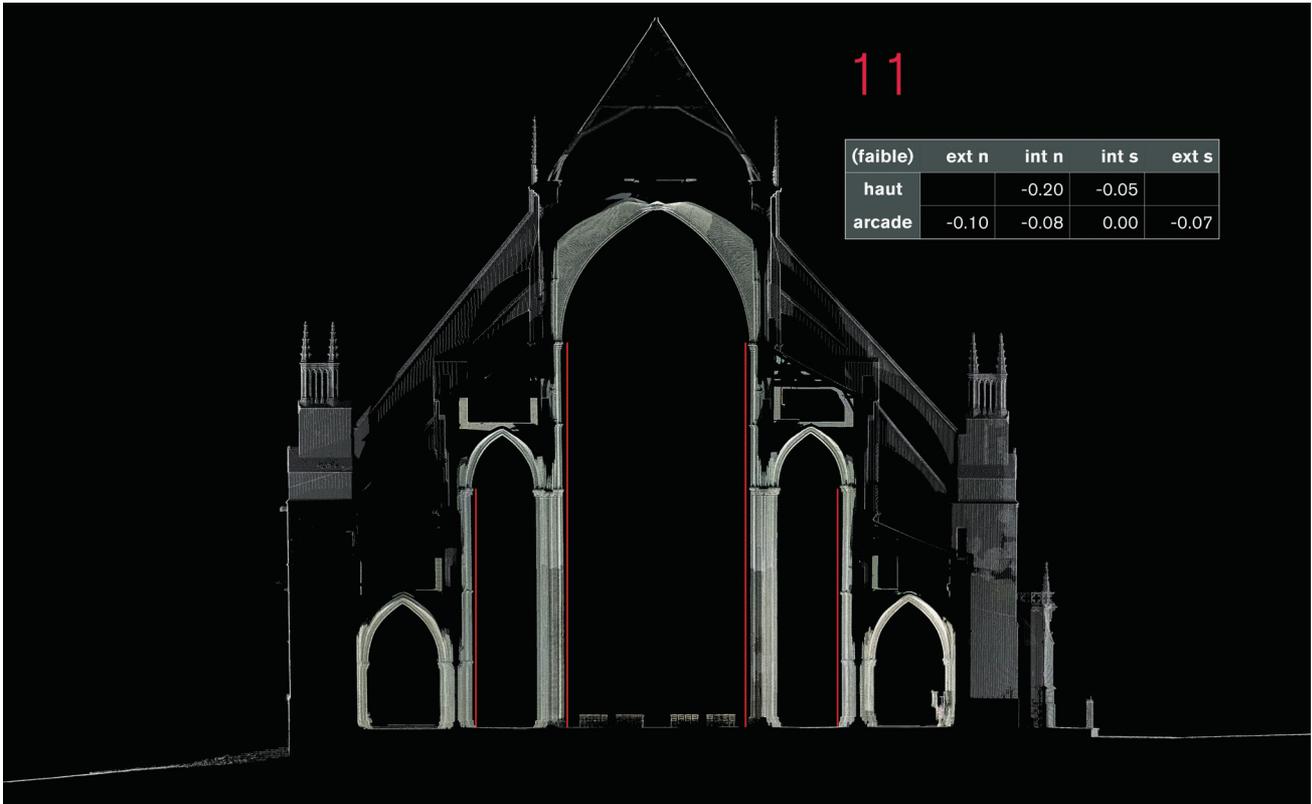


Fig. 14 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur la nef (n° 11).



Fig. 15 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur la nef (n° 12).



Fig. 16 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale sur la nef (n° 14).

pose des tirants de fer à cause de la poussée des voûtes des bas-côtés intérieurs, cette partie de l'édifice a été construite dès le commencement avec des tirants ; c'est, en effet, ce que semble refléter la différence de la section. Ici, nous pouvons faire une autre observation (fig. 13) : il n'y a pas de différence notable entre les déformations des piliers temps fort et temps faible, signe que le support extérieur, aussi minime qu'il puisse paraître (même dans sa forme amplifiée de la nef) et sans expression de cette alternance, était parfaitement adapté à sa tâche.

Dans la coupe n° 11 nous commençons à voir plus clairement les problèmes du tassement différentiel du côté nord de l'édifice (fig. 14). Un nouveau type d'arc-boutant a été introduit ici, plus massif et butant plus haut ; il date vraisemblablement de 1517, installé à la suite de l'effondrement de la tour nord qui avait gravement endommagé les travées les plus occidentales de la nef, côté nord¹⁵. Son remplacement a été motivé semble-t-il par la volonté

d'arrêter le mouvement vers l'extérieur de la superstructure. Mais les fondations du contrefort sur lequel l'arc-boutant prenait appui constituaient le véritable problème car elles l'ont fait pivoter vers l'extérieur. Comme la tour nord, dont la cause de l'échec a été attribuée lors d'une expertise réalisée juste après l'effondrement au « *defectum fundamenti* »¹⁶, les contreforts du flanc nord à partir de ce point et en allant vers l'ouest (fig. 15) sont mal soutenus. L'arc-boutant massif semble, dans ce contexte, avoir été conçu comme un palliatif pour arrêter à tout prix le mouvement, mais sa massivité a probablement contribué au problème.

Dans la coupe n° 14, quelque chose de curieux apparaît : le motif de déformation est entièrement absent (fig. 16). Il y a un retour brutal à la rectilinéarité du côté nord ; le grand pilier est parfaitement d'aplomb. Ceci n'est pas un accident (ou, plutôt, c'est le résultat d'un accident) car cette partie du bâtiment a été presque entièrement reconstruite après l'effondrement de la tour nord. Le pilier a été remplacé, comme l'a été le pilier

adjacent dans le double bas-côté¹⁷. Le contrefort et la culée, qui sont eux-mêmes parfaitement d'aplomb, ont été également reconstruits¹⁸.

Sur les piliers à l'est des tours, la coupe montre le bâtiment dans son état le plus déformé (fig. 17). Le mouvement clairement apparent découle directement du fait que, pour soutenir la construction de la cathédrale gothique, une grande plate-forme a dû être créée à travers une pente qui existe encore (fig. 18 et 19). Les déblais de l'ancien bâtiment, la cathédrale romane, ont probablement été utilisés, mais se sont avérés être moins stables que prévu en particulier lorsqu'ils ont été chargés du poids des tours massives occidentales¹⁹.

Les fondations ont commencé à s'affaisser durant la construction, alors qu'elles supportaient le poids des piliers (fig. 18). Ce tassement a été corrigé alors que le bâtiment était en construction : la déclivité au niveau du triforium et des fenêtres hautes diminue progressivement



Fig. 17 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe transversale des supports orientaux des tours de la façade (n° 15).

par rapport à celle du niveau du sol. Sur le côté sud, la déclivité, qui commence avec la section n° 13 et se poursuit jusqu'au revers de la façade ouest, est de l'ordre de 15 centimètres ; au nord elle est de l'ordre de 17 centimètres (fig. 19). La déclivité du côté nord a également été progressivement compensée au niveau du triforium et des fenêtres hautes. Les fissures spectaculaires qui apparaissent dans les élévations supérieures des deux travées les plus à

l'ouest, au sud, (fig. 20) peuvent être directement attribuées à ce tassement des fondations.

Une preuve supplémentaire de la mauvaise conduite de la structure dans cette partie-ci du bâtiment est visible dans le manque d'aplomb, dans le sens est-ouest, des grands piliers. Sur le côté sud, les piles 14 et 15 sont penchées vers l'ouest, mouvement initié par celui des fondations ; au nord, le même

épanchement vers l'ouest est visible sur les piles 15 et 16. On pourrait s'attendre à le retrouver vers l'extérieur du revers de la façade, de l'autre côté du mur, mais il n'en est rien, grâce à une reconstruction presque totale de cette partie de la façade à la suite de l'effondrement de la tour nord et de la menace d'un échec similaire au sud.

Mais nous devons à ce stade adopter un point de vue macroscopique, pour

comprendre ces déplacements de l'aplomb et de niveau dans un contexte plus large. Le premier est celui de la réalisation technique. Les bâtisseurs de la cathédrale de Bourges ne pouvaient pas savoir précisément ce qui allait se passer au moment du décintrage des voûtes. Ils ont misé sur le fait qu'il n'y aurait pas de défaillance structurelle grâce à une conception radicalement nouvelle, et la suite leur a donné raison. Les arcs-

boutants à la pente si raide (fig. 21), dont l'esthétique potentielle était entièrement subordonnée à la fonction, le système de tirants de fer, une armature longitudinale sous forme d'une série d'arcs de décharge présents derrière les écrans du triforium du vaisseau principal ²⁰ et même l'attention accordée aux fondations dans la majeure partie du bâtiment comme l'attestent les coupes longitudinales à l'est ainsi que les

rapports de fouilles ²¹ : tout cela constitue une matrice structurale tridimensionnelle hautement efficace.

Néanmoins, l'exploit technique n'était qu'un moyen pour une fin. Bien que les coupes présentées ici, avec toute la précision des moyens techniques actuels, offrent un témoignage éloquent de la matrice structurale du bâtiment, elles ne peuvent rien nous apprendre

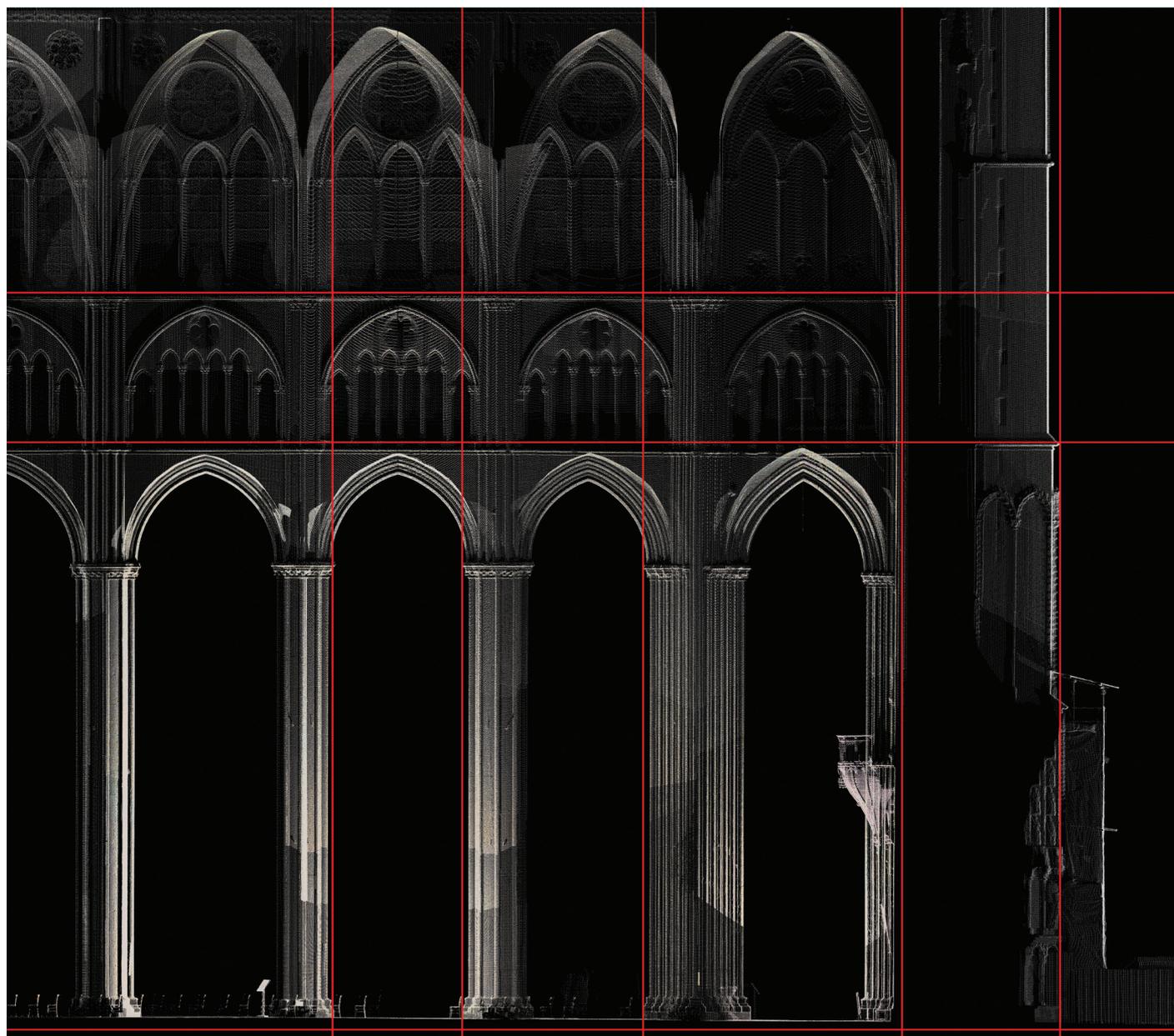


Fig. 18 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe longitudinale, travées occidentales de la nef, élévation sud.

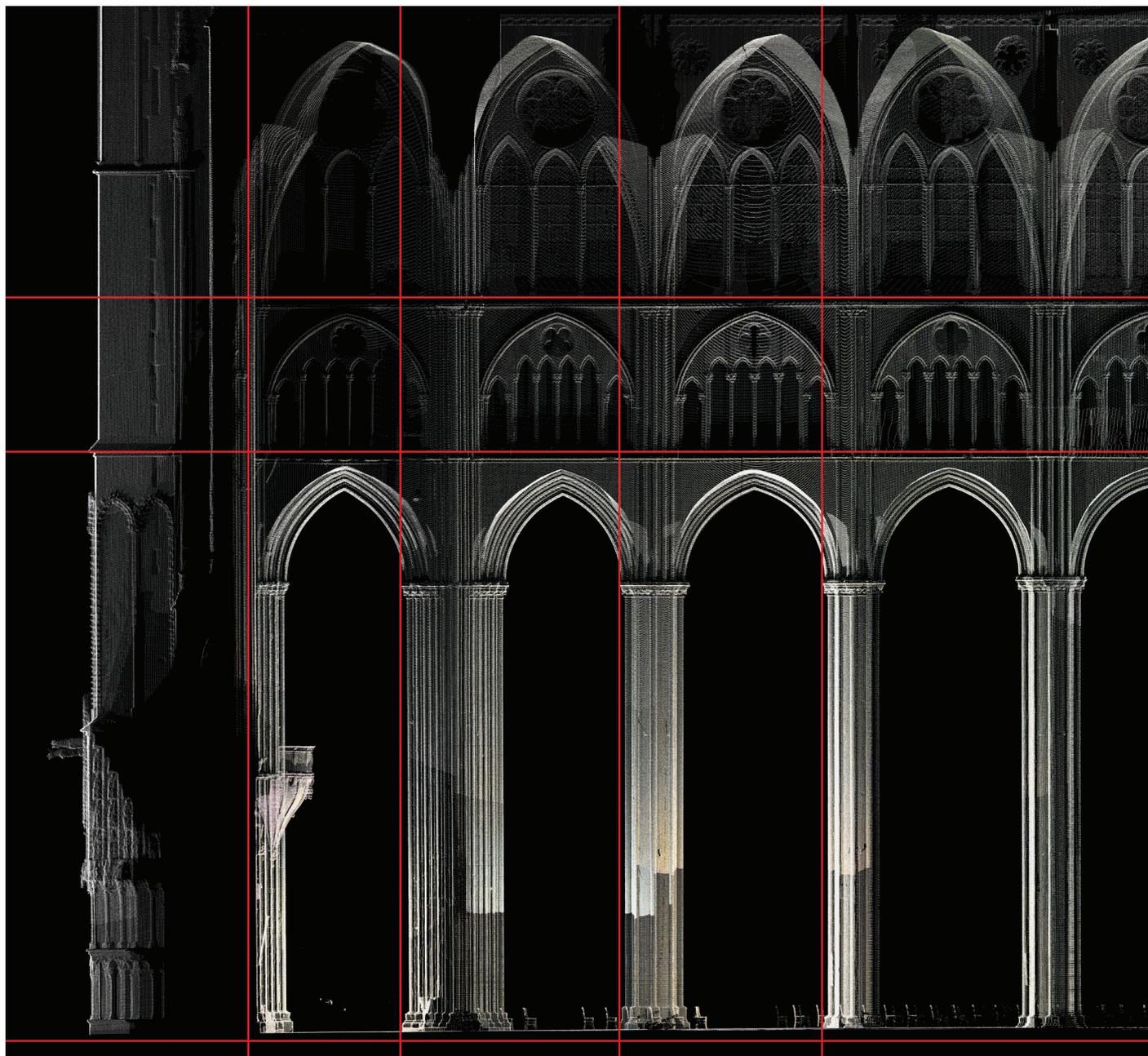


Fig. 19 - Bourges, cathédrale, relevé laser, coupe longitudinale, travées occidentales de la nef, élévation nord.

de l'expérience, qui s'acquiert de façon stéréoscopique en se promenant dans l'espace. C'est ici que la véritable maîtrise technique des bâtisseurs doit être mesurée, dans un langage de perfection architecturale : il s'agit de perpendicularité, un terme que nous privilégions en référence au latin *perpendicularum* qui désigne un fil à plomb ²².

Les bâtisseurs de la cathédrale de Bourges ont créé un système architectural qui a dominé – au moins dans les parties orientales – la force des poussées déformantes et qui a également rendu les rares mouvements imperceptibles grâce au fait que l'espace est articulé autour d'une

série de verticales étonnamment minces, réalisées pour apparaître encore plus fines au cœur du réseau de colonnettes, d'un diamètre indécemment petit, qui ornent leur surface (fig. 22) ²³. Dans ce contexte nous pouvons, avec Francis Salet, nous interroger sur l'absence de tribunes dont le prototype spatial primaire de Bourges, la cathédrale de Paris, a pour sa part été doté ²⁴. Il semble possible que les voûtes à mi-hauteur, nécessaires pour soutenir des tribunes, aient été évitées par désir de préserver les lignes verticales des piliers et des colonnettes dans leur état de perpendicularité d'origine, non entravées par les poussées capricieuses des voûtes.

La cathédrale de Bourges est le fruit d'une vision sophistiquée et délicate, une vision de la perfection architecturale qui nécessita des moyens modernes et efficaces permettant de relever ce défi. Robert Branner a parlé d'une « conception simultanée de tous les éléments » à Bourges. Parmi ceux-ci figure le comportement du bâtiment quand il est soumis aux aléas des poussées horizontales ²⁵. Le balayage laser offre des signes tangibles du fait que les constructeurs de la cathédrale savaient précisément ce qu'il fallait faire pour maintenir cette vision et la porter à son paroxysme.



Fig. 20 - Bourges, cathédrale, mur gouttereau sud des deux premières travées de la nef.



Fig. 21 - Bourges, cathédrale, flanc nord du chœur.



Fig. 22 - Bourges, cathédrale, premier bas-côté sud vu depuis le rond-point du chœur.

NOTES

* Vassar College (USA). Je tiens à remercier Philippe Plagnieux et Patrick Ponsot, aussi bien qu'Étienne Hamon pour leurs suggestions pertinentes. La publication en couleurs des images scanographiques a été rendue possible par le fonds Lucy Maynard Salmon à Vassar College. Cet article est dédié à Robert Mark, qui m'a ouvert le monde passionnant de la structure gothique.

1. W. H. Goodyear, « Architectural Refinements in French Cathedrals. Third Paper. Notre-Dame », *Architectural Record*, vol. 16, 1904, p. 581. Voir A. Tallon, « An Architecture of Perfection », *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. 73, n° 4, 2013, p. 530-554.

2. Voir A. Tallon, « Archéologie spatiale : le bâtiment gothique relevé (et révélé) par laser », dans A. Timbert et S. Daussey (dir.), *Architecture et sculpture gothiques : renouvellement des méthodes et des regards*, Rennes, 2011, p. 63-75.

3. Voir A. Tallon, « Divining Proportions in the Information Age », *Architectural Histories*, n° 1, 2014, <http://journal.eahn.org/article/view/ah.bo/93>.

4. Le relevé laser de la cathédrale de Bourges utilisé pour cette analyse a été réalisé en mai et juin 2008 et a été financé par la Fondation Samuel Kress. Je suis reconnaissant envers les dirigeants de la fondation et également aux personnes suivantes pour leur aide : Stephen Murray, Patrick Ponsot, Jean-Pierre Blin et Pascal Chauveau, et le professeur Peter Allen et ses élèves de l'université de Columbia, Paul Blaer, Matei Ciocarlie et Chase Hensel, qui ont réalisé ce relevé avec un grand dévouement dix jours durant.

5. Voir É. Hamon, *Un grand chantier de l'époque flamboyante : la reconstruction de la tour nord de la cathédrale de Bourges (1507-1537)*, Paris, thèse de l'École des chartes, 1999, vol. 1, 70-80.

6. Voir M. L'Héritier, A. Arles et B. Gratuze, « Étude archéologique et archéométrique des chaînages de fer de la cathédrale Saint-Étienne de Bourges », dans S. Marchant et I. Jourdeuil (dir.), *La cathédrale Saint-Étienne de Bourges : actes du colloque du 12 octobre 2012*, à paraître ; M. Ferauge et P. Mignerey, « L'utilisation du fer dans l'architecture gothique : l'exemple de la cathédrale de Bourges », *Bulletin monumental*, vol. 154, 1996, p. 136-39 ; et R. Branner, *The Cathedral of Bourges and its Place in Gothic Architecture*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1989, p. 47-48, 84 et 226, n. 13.

7. M. Ferauge et P. Mignerey, « L'utilisation du fer », 1996, *op. cit.* note 6, p. 138. Sur le fait de contenir les poussées longitudinales des voûtes d'un bâtiment en cours de construction, voir W. Taylor et R. Mark, « The Technology of Transition: Sexpartite to Quadripartite Vaulting in High

Gothic Architecture », *Art Bulletin*, vol. 64, n° 4, 1982, p. 579-587.

8. W. Taylor et R. Mark, « The Technology of Transition », 1982, *op. cit.* note 7, p. 583.

9. *Ibid.*, p. 583.

10. Sur l'efficacité des arcs-boutants à Bourges voir M. Wolfé et R. Mark, « Gothic Cathedral Buttressing : The Experiment at Bourges and its Influence », *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. 33, 1974, p. 17-26.

11. Sur la chronologie de la construction de la partie supérieure du chevet, voir R. Branner, *The Cathedral of Bourges*, 1989, *op. cit.* note 6, p. 38-48.

12. M. L'Héritier, A. Arles et B. Gratuze, « Étude archéologique... », à paraître, *op. cit.* note 6.

13. Comme suggéré par M. Ferauge et P. Mignerey, « L'utilisation du fer... », 1996, *op. cit.* note 7, p. 134.

14. R. Mark, *Experiments in Gothic Structure*, Cambridge, Mass., 1982, p. 45-47.

15. É. Hamon, *Un grand chantier*, 1999, *op. cit.* note 5, vol. 1, p. 87.

16. *Ibid.*, vol. 1, p. 74.

17. *Ibid.*, vol. 1, p. 75-80.

18. Les tirants de fer placés au-dessus des voûtes des bas-côtés intérieurs n'ont pas été remplacés dans les travées plus à l'ouest au cours de la reconstruction. Les raisons, suggère Étienne Hamon, « tiennent moins à des difficultés techniques (on a parfois mis en cause la baisse de qualité du fer) qu'à l'évolution parallèle de la pensée architecturale et des méthodes constructives. Les maîtres maçons des années 1500 maîtrisent mieux les techniques de contrebutement de l'architecture gothique que leurs aînés et, peut-être, l'emploi des matériaux de construction traditionnels. L'adaptation très attentive de la pierre aux différents usages semble aller dans ce sens. Mais, plus que tout, c'est le perfectionnement extrême de la stéréotomie qui permet cet affranchissement ». *Ibid.*, vol. 1, p. 265.

19. R. Branner, *The Cathedral of Bourges*, 1989, *op. cit.* note 6, p. 16 ; J.-Y. Ribault, *La cathédrale de Bourges*, Arcueil, 1995, p. 62, 76 et 115.

20. Voir R. Branner, *The Cathedral of Bourges*, 1989, *op. cit.* note 6, p. 78.

21. J.-Y. Ribault, *La cathédrale de Bourges*, *op. cit.* note 19, p. 65 et R. Branner, « Fouilles à la cathédrale de Bourges », *Bulletin monumental*, vol. 110, 1951, p. 161-164.

22. Ce qui suit est adapté en partie de mon livre en cours, *The Structure of Gothic*.

23. Voir J. Michler, « Zur Stellung von Bourges in der gotischen Baukunst », *Wallraf-Richartz Jahrbuch*, vol. 41, 1980, p. 30-31 et 40, et R. Recht, *Le croire et le voir : l'art des cathédrales (XII^e-XV^e siècle)*, Paris, 1999, p. 208. Il serait peut-être tentant d'assortir à cette gestion apparente du système spatial le fait que l'espacement entre les piliers du vaisseau central à Bourges diminue progressivement d'est en ouest, souvent interprété comme une modification subtile destinée à corriger un problème de perspective introduit par le rétrécissement dans l'espace du vaisseau vu de l'ouest (H. Focillon, *Art d'Occident : le Moyen Âge roman et gothique*, 3^e éd., Paris, 1955, p. 177 ; J.-Y. Ribault, *La cathédrale de Bourges*, 1995, *op. cit.* note 19, p. 80 ; R. Recht, *Le croire et le voir*, 1999, *op. cit.* note 23, p. 211-13). Mais il nous semble qu'une autre explication doit être recherchée dans la séquence de construction de la nef, entreprise en partie alors que la cathédrale précédente était toujours en place. Le changement d'espacement, de l'ordre de 50 cm (25 par côté) sur une distance de 79 mètres, ne pourrait que très peu modifier l'effet dramatique de ce rétrécissement qui aurait été, en outre, interrompu à mi-chemin par le jubé.

24. F. Salet, « Notre-Dame de Paris, état présent de la recherche », *La sauvegarde de l'art français*, vol. 2, 1982, p. 102. Pour Marcel Aubert, les tribunes de Notre-Dame de Paris n'étaient qu'une « disposition fâcheuse léguée par l'art roman... dont l'architecte [de la cathédrale] n'a pas su se libérer ». M. Aubert, *Notre-Dame de Paris : sa place dans l'histoire de l'architecture du XII^e au XIV^e siècle*, 2^e édition, Paris, 1920, p. 181. Dans la littérature traditionnelle, la présence d'un niveau de tribunes dans les édifices gothiques était expliquée en termes structurels : en l'absence supposée d'une technologie de soutien comme l'arc-boutant, la seule façon d'augmenter la hauteur d'un bâtiment était d'ajouter un autre niveau. Voir J. Bony, « Essai sur la spiritualité de deux cathédrales : Notre-Dame de Paris et Saint-Étienne de Bourges », dans *Chercher Dieu*, Lyon, 1943, p. 158 et E. G. Carlson, « A Note on Four-Storey Elevations », *Gesta*, vol. 25, n° 1, 1986, p. 61. Pourtant, l'arc-boutant était utilisé depuis au moins le milieu du XII^e siècle ; la décision de renoncer aux tribunes à Bourges ne peut donc être considérée comme la conséquence naturelle de la maîtrise de l'arc-boutant, comme cela a souvent été dit.

25. R. Branner, *La cathédrale de Bourges et sa place dans l'architecture gothique*, Paris, 1962, p. 104.

Crédits photographiques : tous les clichés sont de l'auteur.