

Archéologie spatiale

Le bâtiment gothique relevé (et révélé) par laser

Andrew J. TALLON

En 1963, Robert Branner a écrit avec l'autorité qui le caractérise, que la stabilité des murs et des voûtes de la cathédrale de Sens était assurée grâce à « une grande quantité de pierre » plutôt qu'aux arcs-boutants (*fig. 1*)¹. Suit Kenneth Severens au début des années soixante-dix qui a affirmé que les piliers, de trois mètres de large, faisaient office de massifs contreforts internes pour les voûtes dépourvues d'arc-boutant, les voûtains latéraux desquelles avaient à l'origine un bombement important qui descendait assez bas autour des fenêtres hautes de petite taille, et qui donc n'auraient pas eu autant besoin de contrebutement². Au milieu du XIII^e siècle, ces voûtains ont été reconstruits pour permettre l'ouverture de nouvelles fenêtres hautes; d'après Branner et Severens, c'est à ce moment là que l'équilibre du bâtiment a été perturbé et l'installation des arcs-boutants est devenue nécessaire.

En 1982, Jacques Henriot a bouleversé cette histoire adoptée depuis des années³. Il était convaincu – avec raison – qu'il y avait des arcs-boutants depuis le début de la construction, au milieu du XII^e siècle⁴. Les témoignages archéologiques et documentaires, quoique équivoques, renforçaient son opinion; mais apparemment il a trouvé que ceux-ci n'étaient pas suffisants, aussi a-t-il eu recours à des arguments d'une nature purement structurelle, comme l'avaient fait Branner et Severens⁵. Pourtant, pour Henriot, les parties hautes de Sens étaient fragiles et bien trop frêles pour se maintenir face à la poussée des voûtes sans l'assistance d'arcs-boutants. Aucune mention n'a été faite du contrebutement interne offert par les piliers du vaisseau central, ni de la surcharge appliquée sur le mur gouttereau par le toit – une force stabilisatrice non négligeable⁶.

Fig. 1.
Sens, cathédrale
Saint-Etienne,
coupe du chœur
par Charles
Dorian,
1946, détail.
Charenton-le-
Pont, Méd. Arch.
Pat., 82/89/1015,
n° 018805.

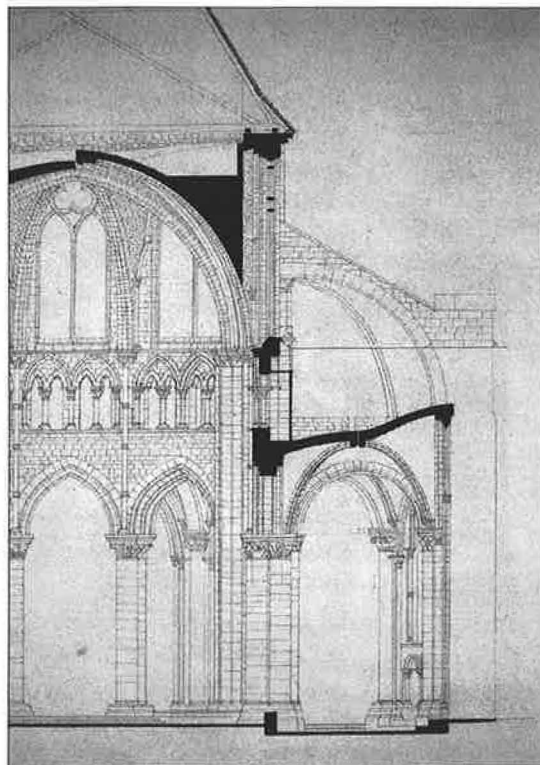




Fig. 2.
Paris, cathédrale
Notre-Dame,
Leica Geosystems
HDS 3000 en
fonctionnement
dans le chœur,
juin 2006.
Cl. A. J. Tallon.

Considéré dans les termes de son historiographie structurelle, la cathédrale de Sens était un bâtiment tout à fait robuste avec des contreforts internes massifs et des arcs-boutants ajoutés au XIII^e siècle; dans les mains d'Henriet, dans le temps court d'une décennie, le bâtiment était devenu faible et structurellement vide, entièrement dépendant d'une série d'arcs-boutants présents depuis le début de la construction, au XII^e siècle.

Pour éviter ce genre d'absurdité, j'ai commencé à chercher le moyen de permettre au bâtiment de nous parler plus directement à travers ce que nous pourrions appeler « l'archéologie spatiale », qui se fonde sur l'observation des déformations du bâtiment. L'archéologie spatiale repose sur la prémisses simple qu'un bâtiment est construit à l'aplomb. S'il ne l'est plus, nous pouvons dire qu'il a été poussé hors d'aplomb par les forces conjuguées de gravité, de pression du vent et des variations thermiques, principalement durant les premières années après la fermeture du chantier, alors que le mortier n'était pas encore sec⁷. Cette déformation peut être documentée avec une précision quasi-parfaite en utilisant un laser

dirigé par ordinateur, qui relève la distance entre lui et chaque surface qu'il « voit » jusqu'à 50 000 fois par seconde (fig. 2). Les données recueillies sont rassemblées dans un document appelé nuage de points; ces multiples nuages acquis dans les diverses parties du bâtiment peuvent ensuite être liés les uns aux autres et créer un plan spatial d'une grande exactitude (fig. 3 voir *cahier central*)⁸.

L'archéologie spatiale peut être considérée comme révolutionnaire comparativement aux approches intuitives et empiriques de Branner, Severens et Henriet, ou encore aux techniques indispensables, quoique par nature approximatives, de modélisation structurelle⁹. Elle fournit en effet, pour la première fois, des informations extrêmement précises sur le comportement structurel actuel du bâtiment. Non pas sur les poussées elles-mêmes, mais plutôt sur les traces du passage de ces poussées, imprimées à jamais dans la pierre et le mortier¹⁰. Examinons maintenant deux exemples concrets pour lesquels l'archéologie spatiale peut aider à résoudre un problème historiographique persistant.

LE CAS DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE PARIS

■ En 1961, Robert Branner a écrit une phrase courte dans un volume largement diffusé, *Gothic Architecture*, qui a eu une influence proportionnelle à celle de son auteur. « L'arc-boutant, écrivait Branner, a été employé pour la première fois dans la nef de Notre-Dame de Paris juste avant 1180¹¹. » Ce n'était pas nouveau :

Branner a simplement cristallisé une idée latente depuis que Marcel Aubert avait essayé de clarifier les discours complexes et contradictoires de Viollet-le-Duc sur les arcs-boutants de Notre-Dame¹². Si l'arc-boutant a été inventé dans la nef, cela impliquait que le chœur n'en avait pas été doté à l'origine. Même si Viollet-le-Duc ne s'est jamais clairement prononcé sur le sujet, l'idée s'est durablement enracinée.

D'après la légende, les deux restaurateurs en chef de la cathédrale, Lassus et Viollet-le-Duc, auraient en grande partie modifier le monument. Si la persistance d'une telle opinion ne repose sur aucune étude scientifique digne de ce nom, concernant les arcs-boutants cette réalité est indéniable¹³. Les témoins archéologiques perdus à jamais et une documentation omise ont ouvert la voie de l'invention historique : d'après Aubert, par exemple, le chœur n'avait qu'un mur boutant pour résister aux poussées de la grande voûte. Mais des indices importants, présentés en partie par Stephen Murray en 1998, suggèrent fortement une idée autre : le chœur était destiné à recevoir une série d'arcs-boutants dès le commencement du chantier dans les années 1160¹⁴. Les témoignages sont préservés sous forme de textes, d'illustrations, de photographies, et, malgré des restaurations parfois draconiennes, dans le bâtiment lui-même – visibles pour la première fois grâce à l'archéologie spatiale.

Le document le plus important, quoique négligé, sur les arcs-boutants du chœur de Notre-Dame a été publié par Lassus et Viollet-le-Duc en 1843. Ils décrivaient la restauration qu'ils proposaient de réaliser pour la cathédrale et affirmaient tout simplement que les arcs-boutants qui n'avaient pas été reconstruits au XIV^e siècle – par implication ceux d'origine – étaient « probablement comme les deux qui existent encore contre les murs du chœur, côté du midi, couvert de dalles, ornés d'une dentelure peu saillante¹⁵ ».

Bien que démolis et reconstruits en 1846, ces deux arcs-boutants, situés sur le bâtiment à l'emplacement des points que nous pouvons appeler sud 5 et 6 – sud 7 étant l'arc-boutant dans l'angle sud-ouest du chœur – sont présents sur plusieurs photographies anciennes, dont une de Louis Fizeau prise en 1845 (*fig. 4*). Ils sont également reproduits sur une maquette de plâtre construite, avec cependant quelques erreurs, entre 1843-1848 (*fig. 5*), et, plus important encore, ils sont enregistrés dans les attachements de maçonnerie, dessins techniques destinés à documenter l'opération de démontage (*fig. 6*)¹⁶. Nous apprenons par les archives que l'un de ces deux arcs-boutants, celui en position sud 5, a été reconstruit en 1817¹⁷. Ainsi, le seul arc-boutant du douzième siècle restant avant la grande restauration du XIX^e siècle était celui en position sud 6.

Quatre églises contemporaines présentent des arcs-boutants similaires à sud 6 de Notre-Dame et

Fig. 4.
Paris, cathédrale
Notre-Dame,
daguerrotypage
du flanc sud par
L.-A.-H. Fizeau,
1845. Reproduit
dans F. Reynaud,
Paris et le
Daguerrotypage,
Paris, 1989,
p. 263, fig. 2.



Fig. 5.
Paris, cathédrale
Notre-Dame,
maquette
construite par
L. T. Galouzeau
de Villepin,
1843-48. Musée
national des
Monuments
Français, Palais
de Chaillot, Paris.
Cl. A. J. Tallon.

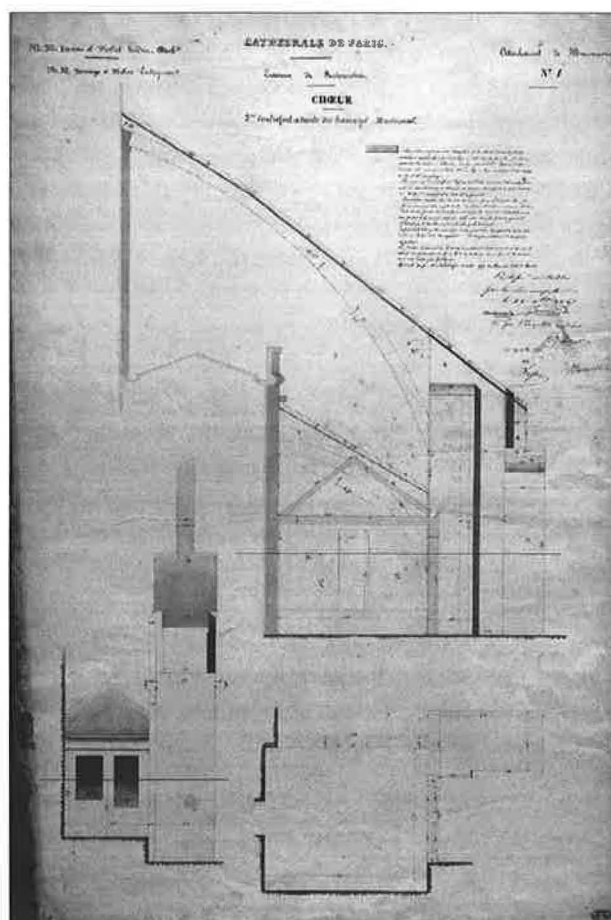
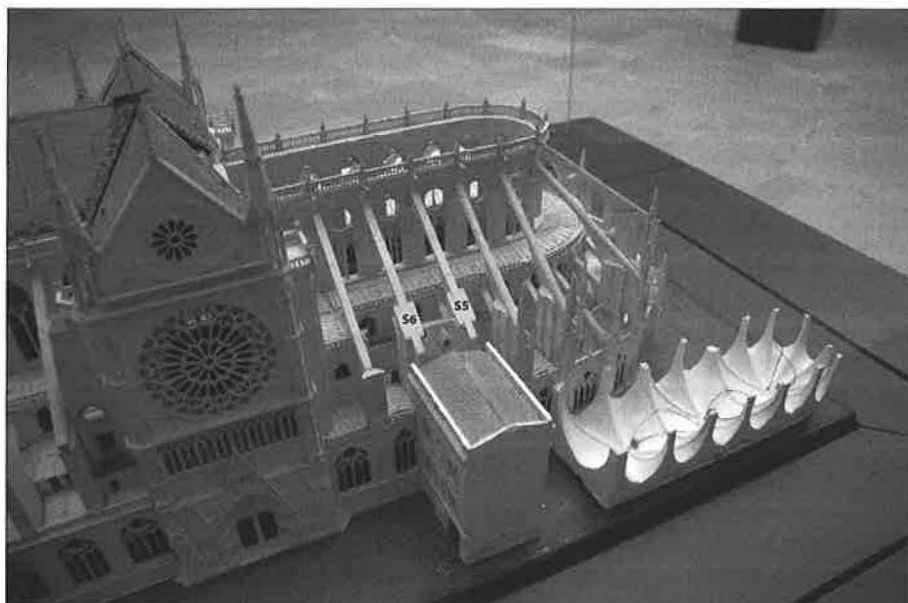
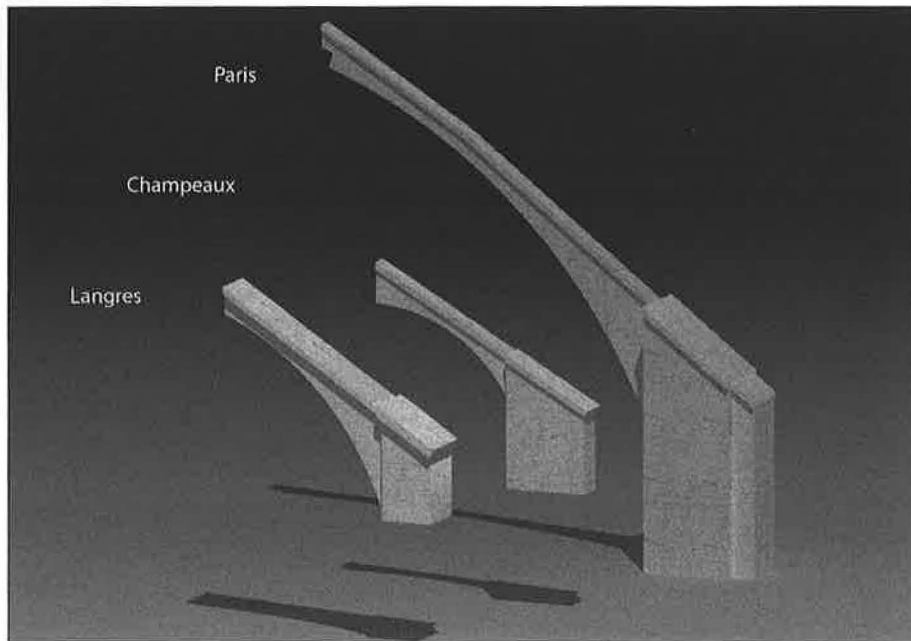
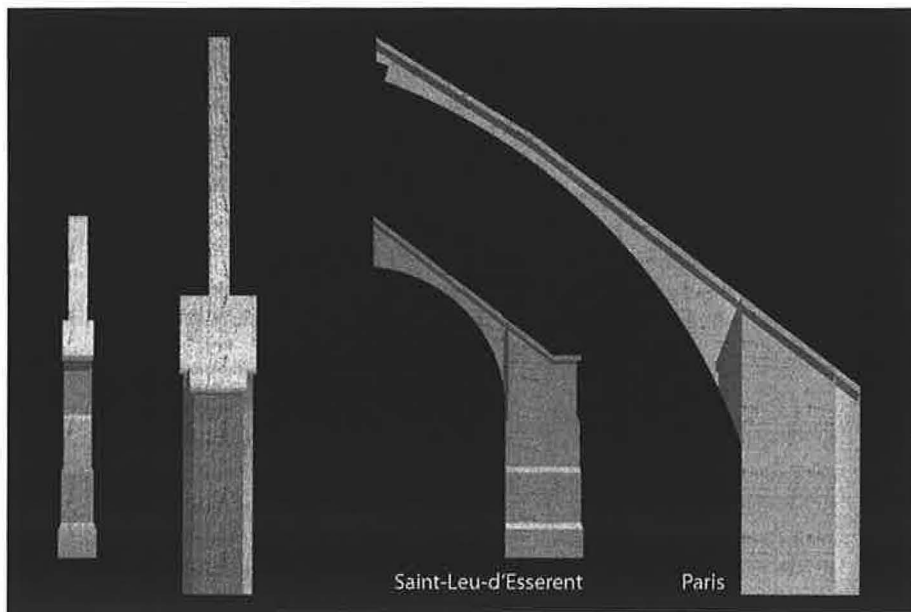


Fig. 6.
Paris, cathédrale Notre-Dame,
attachement de maçonnerie
de l'arc-boutant sud 6, 1846.
Charenton-le-Pont, Méd. Arch.
Pat., 1996/083, n° 55767 [001].



laissent ainsi envisager que ceux de la cathédrale n'étaient pas des ajouts postérieurs : le flanc sud de la nef de la cathédrale Saint-Mammès de Langres, en construction dans les années 1170 (*fig. 7*) ; la nef de Saint-Martin de Champeaux, une église collégiale dans la possession de l'évêque de Paris entreprise aussi dans les années 1170 (*fig. 7*) ; le chœur du prieuré de Saint-Leu-d'Esserent, où une version légèrement modifiée de l'arc-boutant du chœur de Notre-Dame a été employée dans le contexte d'un changement de parti inspiré par le travail en cours à la cathédrale (*fig. 8*) ;



*Fig. 7.
Comparaison de trois maquettes tridimensionnelles : l'arc-boutant sud 6 de Notre-Dame de Paris d'après l'attache-ment de maçonnerie « pré-démolition » (Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat. 1996/083, n° 055767[001]) ; un arc-boutant de la nef de Saint-Martin de Champeaux d'après la coupe de André Donzet (Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat. 0082/077/1004, n° 018839) et des données photogrammétriques acquises par l'auteur ; et le troisième arc-boutant du côté méridionale de la nef en partant de l'ouest de Saint-Mammès de Langres (remplacé depuis), d'après une coupe de Amable Macquet, 1851 (Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat. : 0082/052/2006 n° 27977 [004]), avec largeur de l'arc estimée.*

*Fig. 8.
Comparaison des élévations sud et ouest de l'arc-boutant sud 6 de Notre-Dame de Paris, d'après l'attache-ment de maçonnerie « pré-démolition » (Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat. 1996/083, n° 055767[001]) ; et l'arc-boutant sud 2 de l'abbatiale de Saint-Leu-d'Esserent, d'après les données photogrammétriques acquises par l'auteur.*

Fig. 9.
Tours, Saint-
Martin, la nef
pendant la
démolition par
A. Bourgerie
Villette, ca.
1798, détail.
BnF, Cabinet
des Estampes,
Va 37 (7),
H126424.



enfin, la nef de l'abbatiale Saint-Martin de Tours, transformée avant le milieu des années 1170 par l'adjonction d'arcs-boutants de dix mètres de long (*fig. 9*) dont la ressemblance avec l'arc-boutant sud 6 de Notre-Dame en termes de degré de pente, de forme de tête, de minceur de l'arc et de disposition du chaperon est frappante¹⁸.

Mettons maintenant, pour mieux comprendre son rapport avec les voûtes qu'il a contrebuté, l'arc-boutant de Notre-Dame dans son contexte structurel d'origine en utilisant une coupe reconstituée à travers sud 6 (*fig. 10*). Quand la structure des travées droites est vue en coupe, deux choses apparaissent : d'une part, malgré un emplacement du point de butée qui donne l'impression d'être haut par rapport à l'arc transversal, nous remarquons qu'il est plus ou moins centré sur la masse de la voûte ; d'autre part, l'inclination du dos de l'arc-boutant semble suivre celui des voûtains latéraux. Un emplacement de cet ordre, avec une position moyenne sur le mur haut, semble indiquer une conception prenant en compte une variété de poussées, notamment les poussées engendrées par le vent. Nous ne connaissons pas les intentions du maître-maçon responsable de ces arcs-boutants, mais nous pouvons les supposer bien fondées, puisque cet arc est resté intact jusqu'à sa démolition en 1846 et aurait pu survivre encore longtemps s'il n'avait pas fait l'objet d'une intervention esthétique fatale guidée par une volonté d'homogénéiser l'ensemble¹⁹.

Si ces indices ne sont pas suffisamment convaincants, l'archéologie spatiale par sa précision apporte un témoignage presque incontestable. L'étude scanographique révèle en effet que la partie supérieure et la base des colonnettes engagées dans les travées droites du vaisseau principal sont presque parfaitement d'aplomb. Si les arcs-boutants étaient absents pendant les premières années, lors du durcissement du mortier, la poussée des voûtes dans le vide – présent, même s'il est difficile à

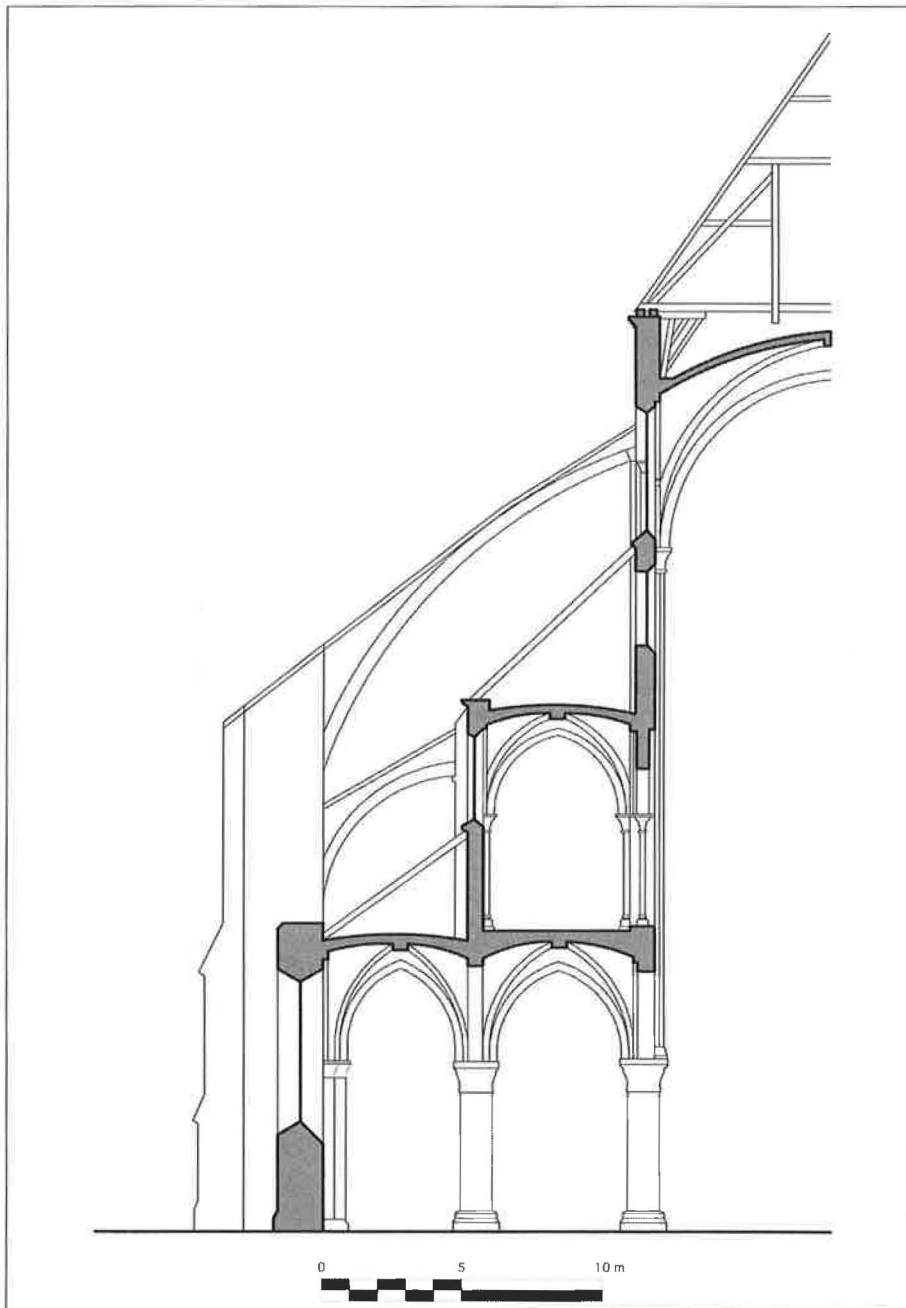


Fig. 10. Paris, Notre-Dame, coupe reconstituée par l'auteur à travers sud 6, montrant les voûtes entre sud 6 et 5, d'après les documents suivants: l'attachement de maçonnerie « pré-démolition » de l'arc-boutant sud 6 (Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat. 1996/083, n° 055767 [001]); une coupe de la nef de Notre-Dame par Adrien Chancel, 1887 (Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat. 1996/083, sans indice); et les nuages de points acquis en juin 2006. Pour pouvoir faire la corrélation entre les faces intérieures et extérieures du bâtiment, une étude photogrammétrique du flanc sud réalisée en 1981 par l'Institut Géographique National (Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat. 96/91 S.557) a été superposée sur l'étude scanographique de l'intérieur; l'alignement a été fait en utilisant les remplages des fenêtres. Ceci a permis de mettre en relation les têtes des arcs-boutants d'origine avec les voûtes. La ferme du toit est fondée sur P. Hoffsummer, Les charpentes du XI^e au XIX^e siècle: typologie et évolution en France du Nord et en Belgique, Paris, 2002, pl. 15a.

quantifier – aurait très probablement provoqué un dévers de ces murs hauts et minces (d'une épaisseur d'environ 70 cm)²⁰.

Par ailleurs, si nous poussons plus loin l'analyse du document, nous voyons ce que l'œil nu ne peut observer, à savoir que les murs hauts du chœur de Notre-Dame, dans certaines travées, sont légèrement en dévers vers l'intérieur²¹. Chaque arc-boutant génère une poussée contre le mur gouttereau due à son propre poids de 65 kilonewtons ou 6,6 tonnes. Si cette force avait été appuyée sur un vaisseau avant l'installation des voûtes, renforcées uniquement par des cintres construits par anticipation de leur construction, la poussée de ces grands arcs-boutants aurait pu être la cause de ce déplacement.

L'abbé normand Robert de Torigny a noté que le chœur de Notre-Dame de Paris a été fini en 1177, *excepto majori tectorio*, ce que nous supposons indiquer, avec Francis Salet, non pas la toiture mais les voûtes²². Avec les données offertes par les photographies, les documents d'archives et maintenant l'archéologie spatiale – qui apporte des informations précises sur la structure du bâtiment dans un débat qui était depuis trop longtemps dépendante de la conjecture²³ – nous pouvons raisonnablement conclure que les arcs-boutants du chœur de Notre-Dame de Paris étaient en place au milieu des années 1170.

LE CAS DE L'ABBATIALE SAINT-GERMAIN-DES-PRÉS

■ L'archéologie spatiale a aussi alimenté un autre débat, d'une égale complexité archéologique et engagé de longue date sur l'équilibre du chevet de l'église parisienne de Saint-Germain-des-Prés (*fig. 11*)²⁴. Les arcs-boutants ont-ils été installés après la construction des parties hautes, ou étaient-ils présents dès la première campagne de construction du milieu du XII^e siècle, comme le soutient brillamment Philippe Plagnieux²⁵?

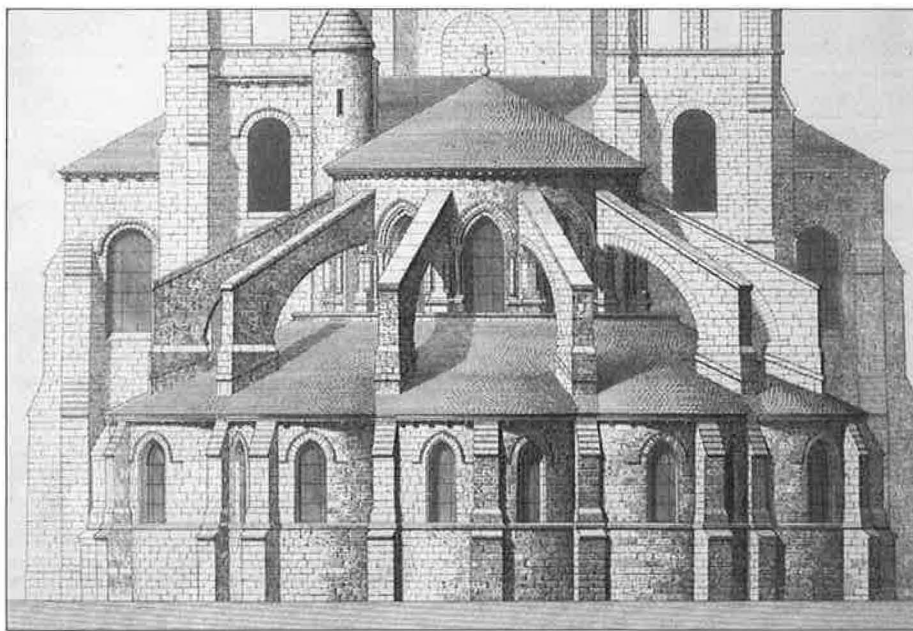


Fig. 11.
Paris, Saint-
Germain-des-Prés,
chevet.
A. Lenoir,
*Statistique
monumentale
de Paris*, vol. 1,
1867, pl. 22.

Deux scans laser ont été suffisants pour localiser les arcs-boutants par rapport au plan du rez-de-chaussée – un sujet de désaccord considérable au vue de la littérature du bâtiment. Les scans révèlent que les culées des arcs-boutants sont placées assez précisément au centre des murs massifs qui séparent les chapelles, et qui, par conséquent, semblent avoir été construits par anticipation de cette fonction de soutènement (*fig. 12*). Le manque presque total de désaxement – celui-ci pourtant considéré depuis longtemps comme un fait acquis²⁶ – montre qu'il est difficile de soutenir, au moins au regard de l'alignement structural et du plan, que les arcs-boutants ont été installés *a posteriori*.

L'analyse des déformations fournit des indices supplémentaires. À Saint-Germain-des-Prés nous pouvons observer une déformation « classique » des murs, en forme de S, créée par les poussées des voûtes du vaisseau principal dans un sens, et par celles des voûtes des bas-côtés dans l'autre (*fig. 13*). Les chapiteaux hauts dans les travées droites sont hors d'aplomb de 8 cm de chaque côté en moyenne. En fait, ceci pourrait être pris comme la preuve d'une installation tardive des arcs-boutants – le mur haut, après tout, a pu être déversé. Mais l'étude scanographique nous révèle que les culées des arcs-boutants des travées droites présentent un dévers presque parallèle à celui du mur gouttereau.

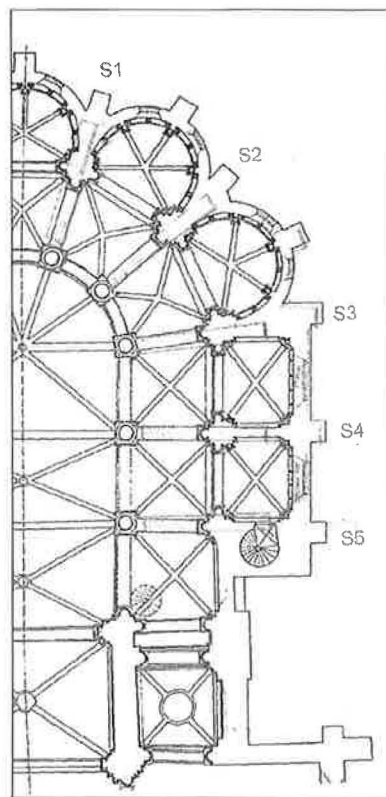


Fig. 12.
Paris, Saint-Germain-des-Prés, plan dérivé de l'étude scanographique entreprise par l'auteur en juin 2006 surimposé sur le plan du chevet publié par Ph. Plagnieux, « Saint-Germain-des-Prés », appendice.

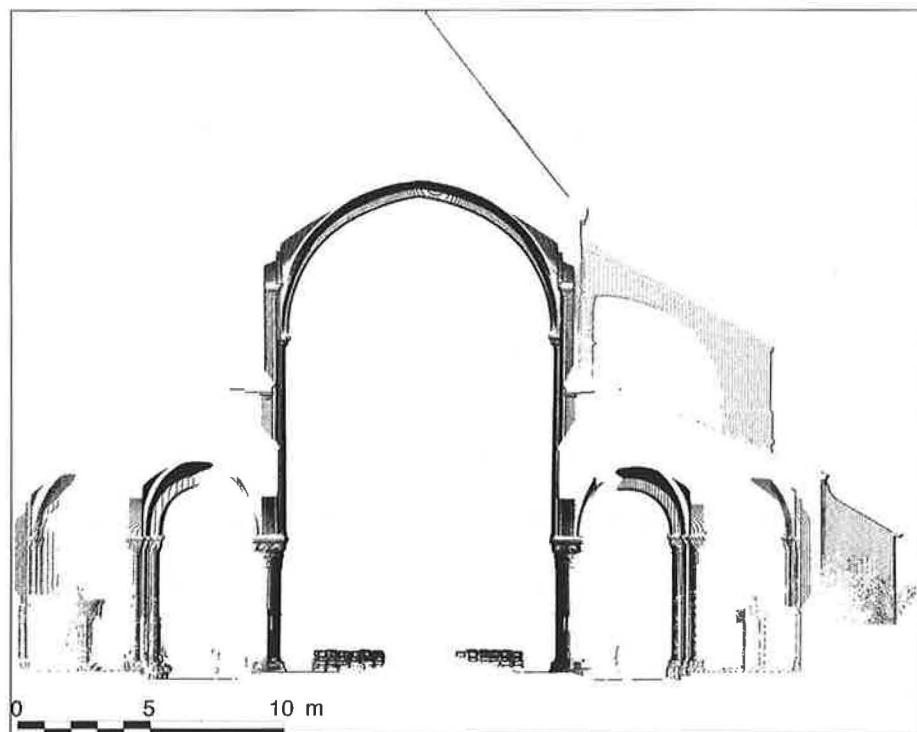


Fig. 13.
Paris, Saint-Germain-des-Prés, coupe à hauteur de sud 5 dérivée de l'étude scanographique entreprise par l'auteur en juin 2006.

L'archéologie spatiale nous apporte donc deux indices clefs qui renforcent les arguments que présentent une archéologie peut-être trop problématique pour être suffisamment convaincante à elle seule : premièrement, que les arcs-boutants étaient présents lors du décintrement des voûtes ; deuxièmement, qu'ils étaient moins efficaces dans leur contrebutement que leurs homologues de la cathédrale.

CODA

■ Nous avons vu qu'avec l'archéologie spatiale il est possible de revisiter de vieilles discussions en apportant des informations supplémentaires et extrêmement précises sur le comportement du bâtiment. Mais en fait, il serait encore mieux de pouvoir faire deux sortes d'observations structurelles : non pas uniquement de lire les déformations du bâtiment grâce à la puissance du laser mais aussi d'avoir des données suffisamment riches pour servir de base pour des modélisations structurelles. L'étude scanographique de Notre-Dame de Paris, par exemple, faute de temps et de conditions d'accès propices, portait uniquement sur les surfaces intérieures du bâtiment – ce qui nous a permis de répondre aux questions développées ci-dessus, mais se révèle insuffisant pour une modélisation de structure, pour laquelle des données sur l'épaisseur des murs et voûtes sont nécessaires.

C'est pour cette raison que nous avons récemment entrepris une étude scanographique de grande ampleur de la cathédrale de Bourges, subventionnée par la Fondation Samuel Kress de New York. La perspective était d'enregistrer, non pas simplement les surfaces intérieures et extérieures du bâtiment mais aussi celles qui sont cachées à la vue, sous les toits et dans les passages. Après dix jours, cinquante-cinq scans et plus de 250 millions de points de données, nous avons pu, créer un document riche d'informations inédites (*fig. 14 voir cahier central*).

Notre intention, à Bourges, est de réexaminer le monument à la lumière des changements survenus dans le paysage historiographique depuis la publication de la monographie de Robert Branner en 1962²⁷. Nous voudrions particulièrement traiter les questions structurelles posées par Branner et Robert Mark²⁸, par une observation proche du bâtiment en utilisant des nouvelles techniques tridimensionnelles de modélisation. Ce travail s'effectue en collaboration avec le professeur John Ochsendorf du Massachusetts Institute of Technology de Boston, qui met en œuvre un moyen destiné à traduire un nuage de points dans une forme plus facilement utilisable dans un logiciel de modélisation numérique.

Nous espérons aussi aborder, grâce aux coupes tridimensionnelles complètes (*fig. 15 voir cahier central*), des questions plus générales concernant les relations entre les arcs-boutants, les voûtes sexpartites, les murs gouttereaux et la série de grands arcs diaphragmes présents à Bourges au-dessus des voûtes. L'intérêt serait non seulement archéologique, mais aussi bénéfique pour la grande campagne de restauration actuellement menée par l'architecte-en-chef Patrick Ponsot ; le bâtiment souffre de quelques problèmes structuraux urgents pour lesquelles une étude des déformations pourrait fournir de précieuses indications.

L'observation des déformations n'est pas nouvelle, mais les observer avec une précision d'environ 5 millimètres l'est certainement. L'archéologie spatiale apporte une vision prometteuse du comportement structurel gothique, et il est vivement

espéré que la technologie soit de plus en plus abordable pour pouvoir élargir ce type d'étude à de nombreux édifices. C'est à travers des représentations comme celles-ci, et grâce à la collaboration de ceux qui peuvent le mieux parler des aspects tectoniques d'un bâtiment – les architectes et ingénieurs de structure – que nous allons pouvoir enfin dépasser les caprices de l'intuition structurelle.

Notes

1. R. BRANNER, « Gothic Architecture 1160-1180 and its Romanesque Sources », *Acts of the 20th International Congress of the History of Art*, vol. 1, Princeton, 1963, p. 92-93.
2. K. SEVERENS, « The Cathedral of Sens and its Influence on the Twelfth Century », Ph. D. thesis, Johns Hopkins University, 1968, p. 59-60.
3. J. HENRIET, « La cathédrale de Sens: le parti du premier maître et les campagnes du XII^e siècle », *Bull. mon.*, 1982, p. 81-174.
4. *Ibidem*, p. 82; voir aussi A. J. TALLON, « Experiments in Early Gothic Structure: the Flying Buttress », Ph. D. thesis, Stephen Murray (dir.), Columbia University, 2007, p. 102-105.
5. J. HENRIET, *op. cit.*, n. 3, 1982, p. 137 et 140.
6. Une série d'analyses photoélastiques et d'éléments finis inédits entreprise par Robert Mark, William Clark et Leonard van Gulick à l'université de Princeton en 1987 suggère en fait que les arcs-boutants jouent un rôle négligeable dans la stabilité des murs gouttereaux de Sens. Deux conclusions en ressortent: premièrement, les arguments structuraux assez stridents d'Henriet ne doivent pas être pris trop au sérieux; deuxièmement, les bâtisseurs de Sens semblent s'être inquiétés pour la stabilité d'un vaisseau exceptionnellement large et voûté, et ont ainsi « surbâti » – une réponse craintive qui était probablement responsable de l'invention de ce qui devait devenir un élément clef du bâtisseur gothique. Je tiens à remercier les auteurs de m'avoir permis de me servir de leur analyse.
7. « La maçonnerie gothique, dans sa jeunesse, a écrit Pol Abraham, est une cire molle où s'impriment, enregistrés pour l'avenir, les efforts successifs résultant du lent progrès de la bâtisse ». P. ABRAHAM, « Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval », *Bull. mon.*, 1934, p. 83. Les observations perceptives d'Abraham se sont confirmées vingt ans après par des expériences faites par l'architecte-en-chef des Monuments historiques Jean-Pierre Paquet, chargé de la restauration des cathédrales de Beauvais, Noyon et de la priorale de Saint-Leu-d'Esserent après la Deuxième guerre mondiale. « Il est bien certain, a écrit Paquet, que les mortiers de chaux grasse demeurèrent plastiques plusieurs mois et quelquefois plusieurs années après leur emploi. Ils ne se sont durcis que lentement et, pendant une certaine période, après le décintrement, des déformations se sont produites; de plus les déplacements temporaires des charges et autres incidents survenus au cours des siècles ont prolongé et accentué cette évolution. » J.-P. PAQUET, « Structures des monuments anciens et leur consolidation », *Monuments historiques de la France*, n° 1, 1957, p. 168-169. Voir aussi J. FITCHEN, *The Construction of Gothic Cathedrals*, Oxford, 1961, p. 262-265; et R. MARK, *Experiments in Gothic Structure*, Cambridge, Mass., 1982, p. 18-19. Il faut aussi noter que les déformations qui peuvent se révéler durant la construction sont parfois rectifiées en cours de route, comme l'a démontré Rowland Mainstone à Sainte-Sophie. R. MAINSTONE, *Hagia Sophia: Architecture, Structure, and Liturgy of Justinian's Great Church*, London, 1997, p. 85-89.
8. Pour plus d'informations sur cette technologie voir Andrew TALLON, « La cathédrale à trois millimètres près », *La grâce d'une cathédrale: Notre-Dame de Paris*, ed. Dany Sandron, Gérard Pelletier et Jean-Pierre Cartier, Strasbourg, sous presse.
9. Pour lesquelles, par ailleurs, les opinions divergent quant à la désignation de la plus adaptée pour analyser des structures de maçonnerie.
10. Les techniques de modélisation structurelle, surtout celles entreprises en trois dimensions, dépendent d'une représentation formelle précise. C'est aussi pour cette raison que l'archéo-

- logie spatiale est capable de fournir des informations essentielles. Pour plus d'informations sur les pratiques de modélisation structurelle courantes voir A. J. TALLON, *op. cit.*, n. 4, 2007, p. 37-43; M.-K. NIKOLINAKOU, A. J. TALLON et J. OCHSENDORF, « Structure and form of early Gothic flying buttresses », *Revue Européenne de Génie Civil*, n° 9-10, 2005, p. 1191-1217; Th. E. BOOTHBY, « Analysis of masonry arches and vaults », *Progress in Structural Engineering Materials*, n° 3, 2001, p. 246-256; et S. HUERTA, « Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach », *Historical Constructions*, éd. P. B. Lourenço et P. Roca, Guimarães, 2001, p. 47-69.
11. R. BRANNER, *Gothic Architecture*, New York, 1961, p. 27.
 12. M. AUBERT, *Notre-Dame de Paris: sa place dans l'histoire de l'architecture du XII^e au XIV^e siècle*, Paris, 1920, p. 76, 86, 97, et 102-07.
 13. La reconstruction des vingt-deux arcs-boutants du chœur a commencé au mois d'août 1846 par l'angle sud-ouest et a terminé par l'angle nord-ouest en juillet 1858. Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat.: 80/14/10: E.-E. VIOLLET-LE-DUC et J.-B. LASSUS, *Journal rédigé par l'Inspecteur en chef des travaux de restauration de la Métropole*, 1844, f° 64.
 14. S. MURRAY, « Notre-Dame of Paris and the Anticipation of Gothic », *Art Bulletin*, n° 2, 1998, p. 229-253; pour l'état actuel des recherches voir A. J. TALLON, *op. cit.*, n. 4, 2007, p. 147-179.
 15. J.-B. LASSUS et E.-E. VIOLLET-LE-DUC, *Projet de restauration de Notre-Dame de Paris: rapport adressé à M. le Ministre de la Justice et des Cultes, annexé au projet de restauration, remis le 31 janvier 1843*, Paris, 1843, p. 12-13.
 16. La maquette, construite par Louis Télesphore Galouzeau de Villepin, se trouve maintenant au Musée national des Monuments Français, Palais de Chaillot, Paris; les attachements pour ces deux arcs-boutants sont à Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat.: 1996/083 n° 055767 [001 et 003].
 17. Voir A. J. TALLON, *op. cit.*, n. 4, 2007, p. 165-167.
 18. *Ibidem*, 2007, p. 161-162, 178-179 et 200-205.
 19. D'ailleurs, par sa présence visible sur un relevé du flanc sud de la cathédrale datant de 1843, qui accompagnait la proposition de restauration de la même année, Lassus et Viollet-le-Duc montrent qu'ils avaient l'intention de le conserver, celui-ci étant probablement dans un état satisfaisant. Que les culées sud 5 et 6 aient survécues aussi longtemps est peut-être dû au fait qu'elles étaient posées sur les contreforts auxquels s'attachait le passage de deux niveaux qui menait au palais de l'évêque Maurice de Sully situé au sud du chœur, et construit en même temps. Quand Jean de Chelles a commencé à étendre les contreforts occidentaux du chœur dans les années 1250 il aurait laissé ces deux contreforts plus courts intacts, puisque attachés au passage épiscopal. Au même titre, Jehan Ravy, qui était chargé de reconstruire les arcs-boutants du chœur dans les années 1320, ne voulant pas poser les culées profondes utilisées dans les travées avoisinantes en porte-à-faux sur les murs du passage épiscopal, auraient laissés les contreforts et les culées sud 5 et 6 en place. L'inviolabilité de ces culées était davantage assurée par Jacques-Germain Soufflot, qui a remplacé le passage épiscopal médiéval par une nouvelle sacristie au XVIII^e siècle, dont le mur nord était contigu avec la face méridionale des culées sud 5 et 6. Voir A. J. TALLON, *op. cit.*, n. 4, 2007, p. 160-161.
 20. Nous pouvons observer ce phénomène très commun à l'église de Saint-Pierre à Bar-sur-Aube, où il est particulièrement sévère: une série d'arcs-boutants a été ajoutée au XVII^e siècle lors d'une opération d'urgence destinée à éviter l'effondrement des voûtes, d'après le devis daté de 1851 de l'architecte Bernard Fauconnier. Charenton-le-Pont, Méd. Arch. Pat.: 0081/0010/0010 et 0082/010/2002 n° 199, 201, 202 et 4408. Une étude photogrammétrique de 1984 illustre clairement ce rajout: la face extérieure de la culée de l'arc boutant est parfaitement d'aplomb, tandis que le mur haut du vaisseau central est sérieusement en dévers. A. LOTTE, *Répertoire des relevés photogrammétriques du Centre de recherches sur les Monuments historiques*, Paris, 1984, s. p.
 21. À ma connaissance, la seule observation publiée de la déformation de Notre-Dame a été faite en 1972 par François Loyer, qui affirmait que les murs gouttereaux du chœur étaient « considérablement déformé[s] » vers l'extérieur par les poussées des voûtes – ce qu'il a

- interprété comme la preuve de l'installation tardif des arcs-boutants du chœur. Fr. LOYER, « Notre-Dame lavée », *L'œil*, n° 208, 1972, p. 21. En fait, il a été trompé par la courbe « classique » en forme de S due à la poussée dans le vide des voûtes des tribunes – qui pourrait effectivement donner l'impression que les murs au-dessus étaient hors d'aplomb dans le sens inverse.
22. F. SALET, « Notre-Dame de Paris, état présent de la recherche », *La sauvegarde de l'art français*, n° 2, 1982, p. 100.
 23. Voir, par exemple, W. CLARK et R. MARK, « The First Flying Buttresses: A New Reconstruction of the Nave of Notre-Dame of Paris », *Art Bulletin*, n° 66, 1984, p. 47-64.
 24. Voir A. J. TALLON, *op. cit.*, n. 4, 2007, p. 123-131.
 25. Ph. PLAGNIEUX, « L'abbatiale de Saint-Germain-des-Prés et les débuts de l'architecture gothique », *Bull. mon.*, 2000, p. 54-57.
 26. Eugène Lefèvre-Pontalis était à l'origine de l'idée que les culées étaient désaxées par rapport aux murs sur lesquels elles étaient posées. E. LEFÈVRE-PONTALIS, « Étude historique et archéologique sur l'église de Saint-Germain-des-Prés », *Cong. archéo. Fr.*, Paris 1919, 1920, p. 365; du même: « L'origine des arcs-boutants », *Cong. archéo. Fr.*, Paris, 1919, 1920, p. 378. En 1930, l'architecte en chef des Monuments historiques Louis Barbier a entrepris une « analyse métrophotographique » du chevet, qui confirmait de façon graphique ce que Lefèvre-Pontalis avait suggéré. D'après Barbier, les culées étaient déplacées aux bords extrêmes des murs entre les chapelles pour pouvoir les aligner avec les nervures de la voûte de l'hémicycle. Mais cet effort d'alignement était insuffisant, et les culées étaient restées dans un état « vicieux » ce qui, pour lui, constituait la preuve que les arcs-boutants n'étaient pas prévus lors de la construction des chapelles. L. BARBIER, « Étude sur la stabilité des absides de Noyon et de Saint-Germain-des-Prés », *Bull. mon.*, 1930, p. 522-24. En 1979, William Clark, dans une réhabilitation des arguments de Lefèvre-Pontalis, affirmait que l'analyse de Barbier offrait « la preuve la plus persuasive » que les arcs-boutants étaient ajoutés postérieurement. W. CLARK, « Spatial Innovations in the Chevet of Saint-Germain-des-Prés », *Journal of the Society of Architectural Historians*, n° 4, 1979, p. 363 et 365.
 27. R. BRANNER, *La cathédrale de Bourges et sa place dans l'architecture gothique*, Paris, 1962; du même: *The Cathedral of Bourges and its Place in Gothic Architecture*, éd. Shirley Praeger Branner, Cambridge, Mass., 1989.
 28. M. WOLFE et R. MARK, « Gothic Cathedral Buttrissing: The Experiment at Bourges and its Influence », *Journal of the Society of Architectural Historians*, 1974, p. 17-26; W. TAYLOR et R. MARK, « The Technology of Transition: Sexpartite to Quadripartite Vaulting in High Gothic Architecture », *Art Bulletin*, n° 4, 1982, p. 579-587.

