

BRUXELLES PATRIMOINES



Une publication de la Région
de Bruxelles-Capitale



DOSSIER
L'ART DE CONSTRUIRE

N°003 - 004

SEPTEMBRE 2012



NUMÉRO SPÉCIAL
JOURNÉES DU PATRIMOINE
RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE



Le siècle des cathédrales

L'INNOVATION GOTHIQUE

PIERRE HALLEUX,

Ingénieur, professeur émérite, Université libre
de Bruxelles

D'importantes innovations techniques apportées à la construction d'édifices tant religieux que civils ou militaires accompagnent l'éclosion et l'essor de l'architecture gothique en Europe occidentale à partir du XII^e siècle. Quelques campagnes de restauration majeures évoquées ici permettent de rendre compte de l'ampleur du phénomène et sont prétextes à une réflexion sur la diffusion des savoirs techniques. Si l'apparition de la voûte sur croisée d'ogives est l'expression architecturale la plus connue associée aux nouveaux systèmes constructifs, l'usage du fer en renforcement des maçonneries en pierre constitue également une remarquable avancée technique. La flèche de la tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles est un exemple exceptionnel de ces prouesses médiévales.

Le siècle des cathédrales est une période relativement brève du Moyen Âge, environ 140 ans au cours de laquelle l'Europe occidentale voit s'élever une multitude d'édifices religieux particulièrement prestigieux. C'est l'époque des débuts du Gothique primitif jusqu'à la pleine maturité du Gothique rayonnant, pendant laquelle la majorité des innovations technologiques est acquise. Le mouvement constructif est alors d'une telle ampleur que certains n'hésitent pas à prétendre que le volume de pierre mis en oeuvre dépasse celui des grandes réalisations égyptiennes.

L'essor de l'architecture gothique coïncide avec des besoins nouveaux générés par une poussée démographique liée aux progrès de l'agriculture et à un climat particulièrement favorable permettant à la population paysanne de produire le nécessaire pour tous, alors que certains quittent l'agriculture pour habiter en ville¹. C'est la période communale. La situation s'inverse à la fin du XIII^e siècle pour devenir franchement mauvaise au XIV^e siècle. Le climat se détériore: les gelées tardives détruisent les bourgeons et touchent ainsi les récoltes de fruits, les pluies et orages de fin d'été anéantissent les récoltes et la famine va faire son apparition, d'autant que les hivers deviennent plus rudes. L'Europe occidentale connaîtra la résurgence

Statue de Saint-Michel
descendue du haut de la tour
de l'Hôtel de Ville de Bruxelles
pour restauration en 1993
(A. de Ville de Goyet
© MRBC).

des conflits armés et ce sera bientôt la guerre de Cent Ans, entraînant pillages et destructions. De surcroît, les grandes épidémies de peste, qui avaient épargné l'Europe depuis quelque temps, sévissent de nouveau. C'est la crise économique et l'inflation galopante met un frein brutal mis à tout investissement constructif.

D'une manière purement conventionnelle, deux faits historiques marquent les bornes de la période considérée. Les premiers balbutiements de l'architecture gothique apparaissent avec la construction de l'abbatiale de Saint-Denis par l'abbé Suger vers 1140 avec les toutes premières croisées d'ogives. D'autre part, la construction du chœur de Saint-Pierre de Beauvais qui sera le record absolu de hauteur avec 48 m à la clé de voûte, soit près du double de la cathédrale des Saints-Michel-et-Gudule à Bruxelles, s'achève en 1272 et sera suivie d'un effondrement partiel en 1284. Cet accident qui marque les esprits n'est en fait qu'un épiphénomène qui correspond à la fin d'une époque.

Fruits de conceptions nouvelles, d'adaptations ou issues de la redécouverte de techniques constructives oubliées, les principales innovations techniques du style gothique ont été mises en œuvre par des bâtisseurs dont le nom n'est que rarement parvenu jusqu'à nous. Un rare exemple de nom bruxellois connu est celui de Jean Van Ruysbroek, maître d'œuvre de la tour de l'Hôtel de Ville et du chœur de la collégiale des Saints-Pierre-et-Guidon à Anderlecht, et qui est aussi intervenu dans les tours de la cathédrale des Saints-Michel-et-Gudule.

Plus tard, le style gothique connaît encore de beaux développements, par exemple avec les chefs d'œuvre de notre Gothique brabançon. Certains chantiers seront poursuivis longtemps, comme le dôme de Milan, achevé sous Napoléon, et la cathédrale de Cologne, vers 1880. Grâce à leurs idées novatrices, les maîtres d'œuvre de ces chantiers plus tardifs sont aussi des «bâtisseurs de cathédrales», de même que les maîtres d'œuvre de chantiers médiévaux d'exception, civils cette fois et non plus religieux.

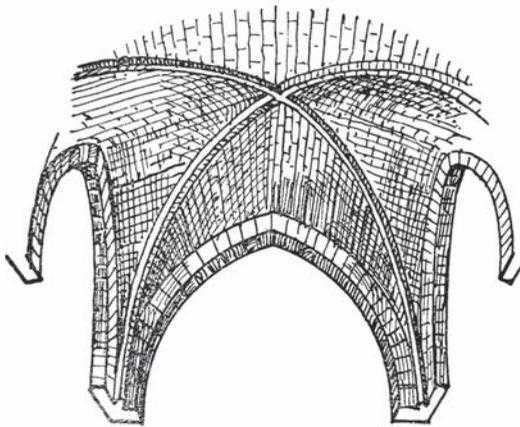
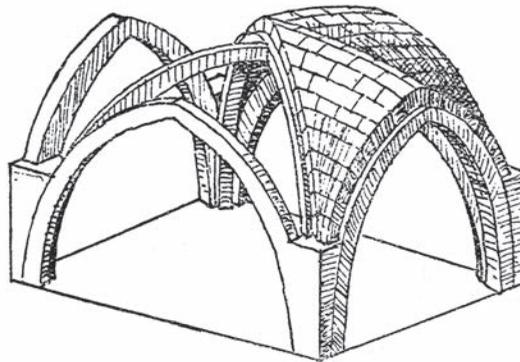


Fig. 1a et 1b

Explications sur les constructions gothiques (DES MAREZ, G., *Traité d'Architecture dans son application aux monuments de Bruxelles*, dessins de G. Rosenberg, Bruxelles, 1921, p. 69-70).

LA VOÛTE SUR CROISÉE D'OGIVES

Le premier élément majeur de l'architecture gothique est l'apparition de la voûte sur croisée d'ogives* (fig. 1a et 1b). Elle succède à la voûte d'arêtes romane qui est l'intersection de deux voûtes en berceau*, deux voûtes cylindriques². Cette intersection se fait en diagonale suivant deux arcs d'ellipse que l'on est alors incapable de tracer correctement: on va les remplacer par des arcs circulaires, et ces arcs diagonaux appelés arcs d'ogive sont donc abusivement considérés comme des arcs pointus; or seuls les arcs doubleaux et formerets sont pointus, l'arc diagonal dit arc d'ogive est circulaire.

Toute voûte, quelle que soit sa géométrie, a tendance à s'aplatir et à développer sur ses supports des forces horizontales intenses orientées vers l'extérieur, appelées poussées au vide*. La voûte romane en berceau exerce cet effort sur toute la longueur des murs gouttereaux*; elle exige des murs épais, consommateurs d'un substantiel volume de matériaux, pas trop hauts et percés seulement de modestes ouvertures produisant un édifice relativement sombre. L'action des forces s'exerce différemment dans le cas d'une voûte sur croisée d'ogives. La voûte repose alors sur des piliers d'angle de la maille carrée ou rectangulaire. Le poids propre de la voûte qui s'exerce sur la tête du pilier est selon le cas de figure



Fig. 2

Façades du transept, percées de vitraux, et arcs-boutants de l'église Saints-Michel-et-Gudule. Détail d'une enluminure (Livre d'heure de Marguerite d'York © KBR, Réserve précieuse).



Fig. 3

Anonyme, triptyque des Quatre-Saints-Couronnés, XVI^e siècle. Détail (© MVB).

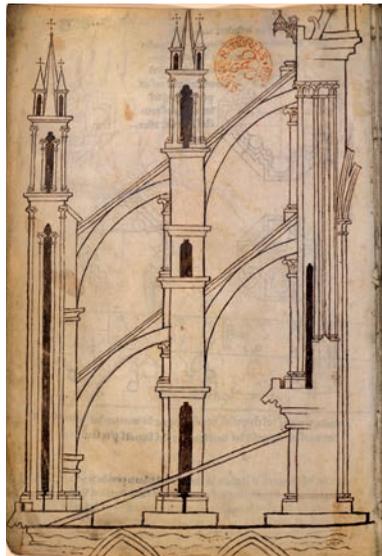


Fig. 4

Dans les carnets de Villard de Honnecourt, ce projet du contrebutement de la cathédrale de Reims, de quelques années antérieures au chantier, prévoit des arcs-boutants inférieurs situés trop bas (comparer avec la fig. 5). Construite ainsi, la cathédrale ne serait pas parvenue jusqu'à nous (© Bibliothèque nationale de France).

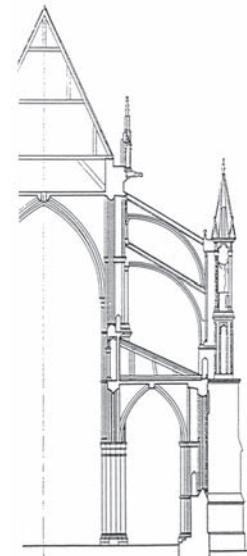


Fig. 5

Coupe de la cathédrale de Reims, exemple classique d'un édifice gothique. La volée d'arcs-boutants supérieurs transmet aux contreforts l'action du vent sur la toiture, et la volée inférieure la poussée au vide de la voûte.

soulagé ou accru par l'action de l'arc-boutant*. Quant à la poussée au vide de la voûte (une action horizontale) qui s'exerce plus ou moins, mais pas exactement dans la direction de l'arc diagonal, sa composante vers l'extérieur est transmise par l'arc-boutant vers un contrefort situé en dehors de l'édifice tandis que sa composante longitudinale est équilibrée par la poussée antagoniste* de la travée voisine. Il en résulte que les murs n'ont plus de fonction porteuse et peuvent être percés de larges baies munies de vitraux qui vont éclairer l'intérieur de l'édifice autrefois sombre, et susciter ainsi le développement de l'art du vitrail³ (fig. 2).

Ce qui a pu inspirer cette formule architecturale, dont au départ le principal foyer de développement est le nord de la France, reste sujet à controverses. Au Moyen Âge, le design de ce type de voûtement est bien sûr empirique, car on ne dispose pas de techniques scientifiques de dimensionnement (fig. 3, fig. 4 et fig. 5). On a très longtemps considéré que les arcs diagonaux en pierre constituaient une ossature porteuse et les voûtains* un simple remplissage. Ce n'est que depuis une trentaine d'années que l'on sait, grâce à des techniques expérimentales d'analyse des contraintes et des méthodes numériques issues de l'aéronautique, que les efforts dans la voûte sont transmis directement à travers les voûtains vers les supports et que les arcs d'ogives ont un rôle essentiellement décoratif. Pendant le chantier, ils ont toutefois pu avoir une utilité comme support des coffrages pour les voûtains⁴.

LA STANDARDISATION DES MATÉRIAUX

Même si l'usage de la brique a connu un succès aux Pays-Bas historiques, la pierre naturelle de construction y étant assez peu abondante, partout ailleurs l'architecture gothique est avant tout une majestueuse architecture de pierre. Le travail de ce matériau évolue aussi à cette époque: on voit apparaître la standardisation, et sa suite logique, la préfabrication, qui auront un impact important sur l'organisation du chantier gothique.

Au Moyen Âge, la standardisation s'impose avec les moellons utilisés pour les fortifications castrales et urbaines. Elle va progressivement s'étendre à d'autres constructions civiles avec pour conséquence que les pierres peuvent arriver directement au chantier dans les bonnes dimensions et qu'elles ne nécessitent plus qu'une retouche occasionnelle sur place. Ceci fait endosser au maître d'œuvre une responsabilité accrue en termes d'organisation du chantier. Il faut que les commandes à la carrière soient précises et livrées à temps pour éviter un arrêt du chantier. Cette livraison doit tenir compte que ce sont souvent des paysans de la région qui assurent le transport; ils ne sont pas disponibles à tout moment en raison des tâches agricoles prioritaires comme les moissons. Les lourds chariots tractés

Au Moyen Âge, la standardisation s'impose avec les moellons utilisés pour les fortifications castrales et urbaines. Elle va progressivement s'étendre à d'autres constructions civiles avec pour conséquence que les pierres peuvent arriver directement au chantier dans les bonnes dimensions et qu'elles ne nécessitent plus qu'une retouche occasionnelle sur place.

par des bœufs s'embourbent vite sur les chemins détrempés et il faut donc tenir compte des conditions de livraison. Par ailleurs, une livraison momentanée surabondante n'est pas possible en raison de l'espace de stockage limité sur le chantier dont l'emprise sur l'espace public est restreinte dans un tissu urbain dense. Enfin, la pierre calcaire calcinée au four à chaux* doit avoir le temps de s'hydrater pour fournir la chaux du mortier.

Quant à la préfabrication elle-même, sa conséquence sur l'organisation du métier est considérable. Jusque là, l'équipe de bâtisseurs se reconstituait au printemps quand les conditions climatiques permettaient la reprise du travail sur chantier; vers la Toussaint, on recouvrait les murs inachevés de fumier pour les protéger de la gelée et chacun rentrait chez soi, loin parfois, vaquer à d'autres occupations jusqu'à la saison

suivante. Le métier de bâtisseur était typiquement nomade et saisonnier, changeant de chantier d'une année à l'autre, alors que la préfabrication qui peut se poursuivre en hiver va le rendre sédentaire et permanent.

L'usage de pierres de gros calibre, connu à l'Antiquité, s'est perdu au début du Moyen Âge, et on utilise des moellons ou des pierres de dimensions modérées retaillées sur place à bonnes dimensions. L'architecture gothique voit le retour de pierres de gros calibre dont la masse peut avoisiner une tonne. Elles doivent bien sûr avoir été taillées correctement à l'avance. Ceci est d'autant plus important que la quantité de déchets de taille est bien plus élevée pour obtenir, au départ d'un bloc donné, une grosse

Pierre taillée plutôt qu'une série de petites. À l'époque romane, ces déchets de taille pouvaient servir de maçonnerie de blocage entre les parements intérieur et extérieur des murs qui devaient de toute façon être épais, mais cette fonction de mur porteur disparaît avec l'architecture gothique.

L'emploi de blocs de grandes dimensions va permettre de construire plus haut avec un moindre volume de matériaux; ceci est dû à la réduction du nombre de joints de mortier et donc de leur épaisseur cumulée sur la hauteur de la maçonnerie. Pour figurer cela, imaginez une pile de cahiers d'écoliers et une pile de petits dictionnaires de même format: la pile de dictionnaires pourra encore s'élever alors que la pile de cahiers devient branlante.

Cette situation est particulièrement flagrante à la cathédrale de Tournai dont la nef est romane et le chœur pleinement gothique. La différence entre le caractère trapu de l'une et l'élégant élancement de l'autre est bien visible, 21 m de haut à la clé de voûte* pour la nef et 33 m pour le chœur. Mais c'est surtout l'aspect massif de l'une par rapport à la légèreté de l'autre qui frappe.

Et cependant, nos calculs montrent que la masse de matériau mis en œuvre par mètre de travée est quasi identique dans les deux cas. On observe d'une part les petits moellons de la nef romane et d'autre part les grosses pierres de taille du chœur gothique, à ne pas confondre avec les pierres de restauration du XIX^e siècle.

Cette évolution a aussi une retombée économique importante: on doit transporter de la carrière au chantier un moindre volume de matériau pour réaliser un édifice de taille équivalente, alors justement que le coût de ce transport est prohibitif, eu égard aux multiples péages qui jalonnent le trajet, aussi bien par voie terrestre que par voie d'eau. On cite des cas où le prix du matériau au départ de la carrière est multiplié par sept à l'arrivée au chantier.

Les petits moellons de l'époque romane étaient manipulables à main d'homme. Pour les grosses pierres gothiques, on va avoir besoin d'engins de levage puissants. Ainsi apparaissent de véritables grues pivotantes dont la force motrice est fournie par une «cage d'écureuil» qu'un ou plusieurs hommes font tourner en marchant à l'intérieur du tambour. C'est encore le maître d'œuvre du chantier qui va les concevoir et qui devient ainsi l'*ingeniator*, l'homme des engins ou l'ingénieur. Ces engins de levage sophistiqués ne sont pas à proprement parler une innovation du temps des cathédrales, car ils étaient bien connus dans l'Antiquité et étaient tombés dans l'oubli par la suite⁵.

L'USAGE DU TRASS

Dans le cadre des matériaux pierreux encore, une redécouverte apparaît au bas Gothique tardif de la fin du XV^e siècle. L'antiquité romaine connaissait en effet l'usage, dans le mortier de chaux, d'un additif intéressant, à savoir la pouzzolane, une cendre volcanique dont le nom vient de Pouzzoles, une petite cité sur la rive nord du Golfe de Naples⁶. Cet additif confère au mortier, une propriété intéressante, appelée aujourd'hui «effet pouzzolanique», qui permet une prise sous eau bien

sûr utile pour les ouvrages hydrauliques, notamment submergés, mais qui donne aussi des mortiers pour terrasses bien étanches et, sous nos latitudes, des joints qui résistent particulièrement bien aux intempéries. On voit apparaître dans nos contrées l'usage de trass*, une roche volcanique de l'Eiffel qui confère au mortier cette propriété pouzzolanique*.

La première mention connue que nous avons nous-mêmes découverte concerne, à l'époque gothique tardive, la toute première restauration de la grande tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles en 1499. Les comptes de la ville montrent en effet, à côté de la chaux et du sable, une commande de trass qui est, à notre connaissance, la première mention connue chez nous. Comme on peut imaginer que, pour un édifice d'une telle importance, on ne se lance pas dans une première expérimentation, il faut supposer que le trass avait déjà fait ses preuves plus tôt.

LE MÉTAL GOTHIQUE

La toute grande innovation des bâtisseurs de cathédrale, dont nous n'avons vraiment pris conscience que récemment, il y a un peu plus d'un quart de siècle, c'est que l'architecture gothique n'est pas seulement comme on l'avait présentée depuis longtemps une architecture de pierre, mais bien aussi la première grande architecture du métal. Les renforts métalliques lui sont indispensables et on a vraiment affaire à de la pierre armée. Le fer est partout et ce en quantités énormes dans l'architecture gothique, mais à part quelques tirants* visibles ici et là et les barlotières* qui maintiennent les vitraux, le métal est enfoui au sein de la maçonnerie même, et donc indétectable à l'œil nu.

Il a fallu des démontages importants rendus nécessaires pour des restaurations lourdes indispensables pour que ce métal vienne au jour. Au XIX^e siècle, Eugène Viollet-le-Duc en mentionne

l'existence et l'utilité, sans toutefois imaginer l'énorme masse de métal qui est découverte aujourd'hui⁷. Si la reconnaissance de tout ce métal a tant tardé, c'est que sa détection n'est pas toujours évidente. Le repérage par radiographie ne peut s'opérer que dans des cas exceptionnels comme celui de la voûte du Panthéon à Paris. L'épaisseur de pierre à traverser exige un rayonnement intense et donc dangereux pour l'environnement, avec des temps de pose très longs de plusieurs heures. Comme les zones étudiées ne sont généralement accessibles que par des échafaudages, le repérage classique par détecteur de métaux est perturbé par la proximité des tubes d'échafaudage.

On peut considérer aujourd'hui que l'essor des grandes cathédrales a été possible grâce aux progrès de la sidérurgie. Jusque-là, le fer était resté un matériau précieux et trop onéreux pour être utilisé à large échelle dans l'architecture. Le bas-fourneau produisait à chaque opération une éponge de fer d'au mieux quelques kilos qu'il fallait alors longuement forger à bras d'homme. Si quelques applications sporadiques du fer dans la construction se rencontrent, le métal est surtout réservé à la fabrication des armes. L'apparition du haut fourneau qui produit à chaque opération non plus quelques kilos mais quelques dizaines de kilos

Le fer est partout et ce en quantités énormes dans l'architecture gothique, mais à part quelques tirants visibles ici et là et les barlotières qui maintiennent les vitraux, le métal est enfoui au sein de la maçonnerie même.

de fer va modifier la situation. En complément, l'ordre cistercien se développe de manière fulgurante en Europe occidentale. Les Cisterciens ont une exceptionnelle maîtrise de l'eau, et donc de l'énergie hydraulique: les moulins vont commander les soufflets nécessaires tant pour le fourneau que pour la forge, et le martinet* remplace aussi le bras de l'homme pour forger. Ainsi le prix de revient du métal chute et son utilisation peut se généraliser en architecture.

DES RESTAURATIONS RÉVÉLATRICES

Les découvertes foisonnent aujourd'hui et nous nous limiterons à citer quelques exemples qui montrent l'importance du fer: celui de la cathédrale de Beauvais⁸ qui fut le premier grand édifice gothique pour lequel une recherche détaillée a été développée en la matière et deux chantiers en Belgique (la grande tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles⁹ et la cathédrale de Tournai¹⁰).

Le cas de la cathédrale de Beauvais est parfaitement illustratif (fig. 6). À Beauvais, les contreforts* sont des lames de pierre d'un élancement exceptionnel reliées les unes aux autres par des tirants en fer forgé. En 1982, l'architecte en chef des monuments historiques constate que les extrémités des barres rouillent à l'endroit où elles pénètrent dans la pierre, ce qui s'explique aisément puisque c'est une zone préférentielle de condensation de l'humidité. La rouille conduit bien sûr à une détérioration de la pierre. Or les tirants pendent sous leur poids propre et il est visible à l'œil qu'ils ne sont pas tendus:

À la grande tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, la restauration lourde entreprise de 1987 à 1997 a conduit à la mise au jour d'une quantité fabuleuse de métal enfouie dans la maçonnerie.

ces tirants sont donc nuisibles alors qu'ils semblent inefficaces, de sorte que la décision est prise de les enlever¹¹. Peu après, lors d'un grand vent -Météo France signale que Beauvais est une région particulièrement ventée- le contremaître du chantier de restauration voit les contreforts osciller dangereusement, à tel point que le lendemain un claveau* neuf d'arc-boutant qui vient d'être remplacé est trouvé éclaté.

C'est récemment, il y a une dizaine d'années seulement, que le rôle de ces tirants en apparence inutiles a été mis en évidence sur base d'une simulation numérique. Les turbulences qui se forment entre les hauts contreforts y provoquent des sollicitations rythmiques,

malheureusement en phase avec les fréquences propres d'oscillation de ces structures forcément assez souples vu leur élancement. Les tirants non tendus ne retiennent pas les contreforts, mais jouent le rôle d'amortisseurs qui modifient leur spectre de fréquences propres, lesquelles ne correspondent plus aux fréquences d'excitation provoquées par les turbulences rendant celles-ci non dangereuses, exactement comme une balançoire qui s'arrête lorsqu'on ne la pousse pas en rythme.

Un autre exemple relatif à Beauvais concerne la tour achevée en 1569 sur la croisée du transept, dont la flèche dépassait les 150 m, en faisant de cet édifice le plus haut de France, puisqu'à l'époque Strasbourg n'était pas française. L'effondrement célèbre de cette tour alors que la procession quitte l'église lors du jeudi de l'Ascension 1573 a longtemps été expliqué par le fait que la tour n'était confortée que de trois côtés, le chœur et les deux bras du transept, alors que le budget n'avait jamais été disponible pour la nef. Des observations récentes ont montré que la base de la tour n'avait jamais été pourvue de cerclages métalliques¹².

Ces ceintures sont cependant bien utiles, comme les cerclages métalliques des cheminées d'usine en briques; les grosses barres de fer forgé qui assurent cette fonction, visibles au beffroi de Bruges, sont aussi de taille appréciable. L'accident de 1573 à Beauvais serait donc dû au fait qu'à cette époque on a privilégié la stéréotomie* et la belle taille de la pierre, tout en méprisant ces «incapables» de l'époque médiévale qui avaient recours au métal.

À la grande tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, la restauration lourde entreprise de 1987 à 1997 a conduit à la mise au jour d'une quantité fabuleuse de métal enfouie dans la maçonnerie (fig. 7, fig. 8, fig. 9, fig. 10, fig. 11 et fig.12). Révisant l'estimation de 15 tonnes que j'avais proposée à l'époque, je pense que la masse de fer forgé mise en œuvre pour sa construction de 1449 à 1455 est plus proche de 25 tonnes¹³. À côté des



Fig. 6
Contreforts d'un élancement exceptionnel à la cathédrale Saint-Pierre de Beauvais (photo de l'auteur).



Fig. 7

La tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles (1449-1455) atteint une hauteur de 92,5 m au pied de saint Michel (A. de Ville de Goyet, 2012 © MRBC).

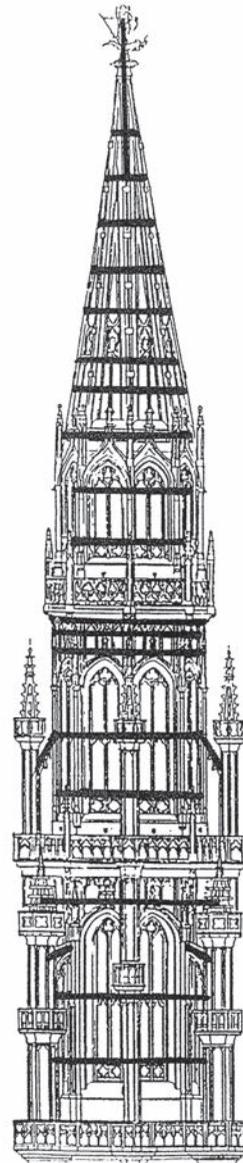


Fig. 8

Schéma de la tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, les trois galeries supérieures et la flèche. En traits forts les renforcements métalliques d'origine: trois cerclages à la première galerie; quatre cerclages et une étoile à la deuxième galerie; deux cerclages et une étoile à la troisième galerie; un cerclage de base et sept cerclages à la flèche, armature des arcs-boutants et hampe de la girouette (dessin de l'auteur).

**Fig. 9**

Cerclage métallique d'origine à la flèche de la Tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles (photo de l'auteur).

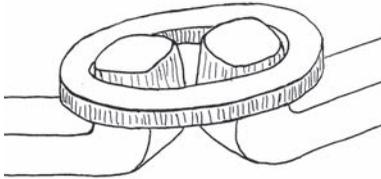
**Fig. 10**

Schéma d'assemblage, noyé au sein de la maçonnerie, des barres de cerclage (section $\pm 5 \times 3,5$ cm) de la flèche de l'Hôtel de Ville de Bruxelles (1449-1455). On retrouve ce même principe, dû au même maître d'œuvre, Jean Van Ruysbroeck, dans les cerclages du chœur de la collégiale des Saints-Pierre-et-Guidon à Anderlecht (dessin de l'auteur).

**Fig. 11**

Analyse métallographique d'un anneau d'assemblage d'un cerclage de la flèche de l'Hôtel de Ville de Bruxelles: attaque au nital (acide nitrique et alcool) d'une coupe polie pour mettre en évidence la structure de forgeage (photo de l'auteur).

**Fig. 13**

La cathédrale de Tournai en restauration (photo G. Focant ©SPW).

**Fig. 12**

Analyse métallographique d'une coupe dans la hampe de la girouette de l'Hôtel de Ville de Bruxelles: section carrée de 10×10 cm constituée de 3 pièces de $\pm 3 \times 10$ cm forgées indépendamment et assemblées par forgeage (photo de l'auteur).

**Fig. 14**

Le métal est aussi utile en cours de chantier: lors du décoffrage, une voûte sur croisée d'ogives exerce d'emblée ses poussées au vide, dont la composante transversale est reprise par les arcs-boutants, alors que la composante longitudinale ne sera auto-équilibrée par la travée suivante que lorsque celle-ci sera achevée. À titre temporaire, une chaîne provisoire qui relie les naissances de l'arc assure l'équilibre. À Tournai, les anneaux de fixation de la chaîne sont encore présents ici et là. Le tube d'échafaudage moderne a été enfilé dans l'anneau médiéval encore en place (photo de l'auteur).

renforts plus classiques qui ont été décrits par ailleurs, des situations surprenantes ont été rencontrées sur cet édifice. La girouette du saint Michel en cuivre repoussé est montée sur une hampe en fer forgé de section carrée de 10 x 10 cm. On pouvait penser qu'un ancrage dans la maçonnerie de deux ou trois mètres était suffisant, alors que les sondages ont montré que cette hampe descendait à huit mètres de profondeur dans le massif de la flèche de la tour. Ce résultat étonnant s'explique par le fait – que j'ai pu calculer – que l'effet combiné du vent sur la girouette et sur la maçonnerie provoquait dans cette dernière une zone de traction située à quelques mètres sous la base du saint Michel, susceptible de fissurer les joints de mortier et que la hampe était non seulement un ancrage de la girouette mais aussi une armature, un renfort de pierre armée nécessaire à la stabilité de la flèche même. Cette barre de fer doit avoisiner les 800 kg. Un autre cas surprenant est celui des arcs-boutants qui relient la tour principale aux tourelles de contrefort dont le rôle s'avère plutôt décoratif. Une surprise m'attendait lors de l'arrivée des résultats de la modélisation numérique: en fonction de l'orientation du vent certains arcs-boutants passaient en phase de traction, ce qui était physiquement anormal puisqu'un arc-boutant est conçu pour pousser. De là à penser à une erreur dans l'introduction des données à l'ordinateur... Mais l'état de délabrement des pierres de ces arcs-boutants était tel qu'il fallait les remplacer à neuf plutôt que de les restaurer, et lors du démontage, nous avons constaté que le bâtisseur médiéval était conscient de ce risque de traction, car une armature métallique était noyée dans la maçonnerie.

À la cathédrale de Tournai, en cours de restauration (fig. 13), une tornade frappe le centre-ville en août 1999; c'est un événement météorologique exceptionnel, et les dégâts sont importants. Entre autres, deux pinacles* sont abattus. Ces pinacles avaient été conçus en style néogothique au XIX^e siècle, en s'inspirant des modèles en plâtre rachetés à bas prix au chantier de la cathédrale de Cologne en voie d'achèvement. Lors de ma visite au chantier de

Tournai quelques jours après la tornade, ma stupéfaction a été de voir que les pinacles abattus n'étaient pas pourvus du classique tenon métallique destiné à les solidariser à leur socle. Cette technique de renforcement était cependant connue et pratiquée dès l'Antiquité: tous les tambours de colonnes étaient solidarisés les uns aux autres par des tenons souvent en bronze, scellés au plomb dans le marbre. L'objectif était là sans doute moins une résistance au vent qu'à la sollicitation horizontale provoquée par un éventuel séisme. À Tournai, a-t-on cru, au XIX^e siècle, que le poids des pinacles suffirait à les stabiliser, ou bien s'agit-il d'une négligence de chantier? En tout cas, si l'armature métallique avait été posée, les pinacles n'auraient sans doute pas été renversés par la tornade de 1999. Par contre, d'autres traces de métal médiéval sont visibles à Tournai (fig.14).

À Paris, la Sainte-Chapelle présente une fantastique panoplie de renforcements métalliques, mais le métal, si coûteux qu'il soit à l'époque, était le bienvenu dans ce bijou destiné à abriter des reliques, et ce sans limite de budget. On peut ainsi multiplier les exemples qui montrent la nécessité des armatures métalliques dans l'architecture gothique et pas uniquement dans l'architecture religieuse. L'exemple de la grande tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles a déjà été cité. Un autre cas étonnant est celui du donjon du château de Vincennes, en chantier de 1361 à 1369, dont la récente restauration a fait apparaître également une incroyable quantité de fer forgé, l'estimation étant là aussi de 20 tonnes de métal.

LA DIFFUSION DES SAVOIRS

Une dernière innovation, et non des moindres, des bâtisseurs de cathédrales est la diffusion large et rapide de l'information. Il faut réviser complètement une idée répandue par des ouvrages à succès qui parlent des «secrets des bâtisseurs de cathédrales». L'idée n'apparaîtra que tardivement. Ainsi notamment à Bruxelles, lorsqu'en janvier

1449, Jean Van Ruysbroek prête devant les échevins le serment qui fait de lui le maître d'œuvre de la tour de l'Hôtel de Ville, il doit s'engager – le texte du serment est conservé aux archives – à ne pas quitter la ville sans autorisation avant la fin des travaux, afin d'éviter qu'il aille exporter son savoir dans une ville concurrente, par exemple Louvain, qui rivalisait alors avec Bruxelles pour le titre de la capitale des Pays-Bas bourguignons.

Dans ce siècle de l'essor des constructions gothiques, l'information circule librement et chacun met son savoir à disposition. Un rare document de l'époque, les carnets de Villard de Honnecourt¹⁴, datés de 1235 environ, nous livre sans réserve une description de tous les procédés de construction qui lui sont connus à l'époque. Même en l'absence de prises de brevets, il n'y a pas de rétention de l'information. Nous sommes loin de Léonard de Vinci qui n'hésite pas à écrire: «n'enseigne pas et tu seras excellent»¹⁵, ce qui, dans le contexte, signifie: «Si tu veux devenir riche, ne divulgue pas ton savoir». C'est beaucoup plus tard qu'apparaîtra la notion de secrets à diffusion restreinte réservés aux membres de la corporation. Au XIII^e siècle, à l'époque des bâtisseurs

Dans ce siècle de l'essor des constructions gothiques, l'information circule librement et chacun met son savoir à disposition.

de cathédrales, la circulation des personnes et des idées est libre, malgré des situations parfois tendues. Les grands maîtres d'œuvre sont des hommes réputés auxquels on fait appel de très loin. Ainsi certains bâtisseurs français sont amenés à exporter leur savoir en Angleterre, en Suède, ou à se rendre comme experts au dôme de Milan. Si ces situations favorables sont éphémères, c'est sans doute là l'invention majeure des bâtisseurs de cathédrales: cette rapide et large diffusion de l'information est la préfiguration du libre-échange d'un grand marché européen.

Pierre Halleux était membre du collège d'experts pour la restauration de l'Hôtel de Ville de Bruxelles et président du collège d'experts pour la restauration de la cathédrale de Tournai.

GLOSSAIRE

Arc-boutant: arc en pierre d'un quart de cercle ou moins, qui s'appuie sur la tête d'un pilier au niveau de la retombée de la voûte pour transmettre à un contrefort extérieur la poussée au vide: ceci est le rôle de la volée inférieure d'arcs-boutants. Des arcs-boutants situés plus haut prennent appui sur le mur gouttereau et transmettent au même contrefort la poussée du vent sur la toiture: c'est la volée supérieure d'arcs-boutants. Il arrive aussi que l'arc-boutant supporte une rigole destinée à l'évacuation des eaux de pluie.

Barlotière: barre en fer qui traverse horizontalement l'ouverture d'une fenêtre pour tenir les vitraux.

Berceau: la voûte en berceau, typiquement romane, et avant cela romaine, est constituée d'un demi-cylindre circulaire. Le demi-cylindre est parfois brisé, comme à Autun.

Chaux: la calcination de pierres calcaires au delà de 800°C donne de la «chaux vive», qui est corrosive; plongée dans l'eau, elle donne la «chaux éteinte»; celle-ci mélangée à un sable et un peu d'eau constitue un mortier de chaux dont la prise est très lente, ce qui laisse longtemps le bâtiment adaptable sans dommage à d'éventuels tassements. Le gaz carbonique de l'air va lentement carbonater la chaux éteinte (5 siècles pour un joint de 50 cm de profondeur) et reconstituer ainsi le carbonate de calcium, qui est le composant principal de la pierre calcaire de départ.

Claveau: pierre taillée en forme de trapèze pour constituer un arc. Lorsque l'arc (d'ogives, boutant, gouttereau, formeret...) est constitué de tronçons circulaires, le rayon de courbure constant conduit à ce que tous les claveaux soient identiques, ce qui permet la standardisation et dès lors la préfabrication.

Clé de voûte: claveau parfois sculpté situé au sommet de la voûte ou d'un arc. Contrairement à une croyance répandue, la clé de voûte est posée la première et non la dernière sur le cintre. Pour bloquer la voûte, tous les claveaux ont d'ailleurs indistinctement le même rôle.

Contrefort: pilier profond et massif, souvent situé à l'extérieur de l'édifice, qui résiste par son poids propre à la poussée exercée sur un mur ou un autre pilier, soit par contact direct avec le mur à conforter, soit par l'intermédiaire d'un arc-boutant qui va lui transmettre l'effort horizontal vers l'extérieur.

Croisée d'ogives: intersection de deux voûtes. Dans le cas des voûtes romanes cylindriques (voûtes en berceau), les intersections sont elliptiques, ce qui était difficile à dessiner proprement au Moyen Âge. On les remplace par des arcs diagonaux circulaires dont les cintres sont plus faciles à réaliser, et dont les claveaux identiques permettent la standardisation et la préfabrication. Il en résulte que les arcs doubleaux et les arcs formerets deviennent des arcs pointus.

Gouttereau: les murs gouttereaux (ou «goutterots») sont les murs de la grande nef situés au-dessus des grandes baies vitrées, immédiatement sous le bord de la toiture, au niveau de la retombée de la voûte, et qui reçoivent la pluie.

Martinet: marteau mécanique généralement mis en action par un moulin à eau et qui remplace le marteau manipulé par la main du forgeron pour frapper le fer sur l'enclume.

Pinacle: petite tourelle décorative située au-dessus des piliers sur le pourtour de la toiture et principalement sur les contreforts. Par leur poids, les pinacles pouvaient contribuer à la stabilité des contreforts.

Poussée au vide: toute voûte et tout arc, quelle que soit sa forme, exerce sur ses supports des forces verticales qui correspondent à son poids propre, et des forces horizontales vers l'extérieur; les poussées au vide qui correspondent à la tendance de la voûte à s'aplatir. Ces poussées peuvent être très intenses, par exemple de l'ordre de 15 tonnes dans le cas de la cathédrale de Tournai.

Pouzolane: cendre volcanique trouvée à Pouzzoles, petite cité sur la rive nord du Golfe de Naples; additionnée au mortier des Romains, cette cendre permettait une prise sous eau pour des travaux hydrauliques, et en tout cas une prise plus rapide et une meilleure étanchéité du mortier assurant sa longévité. On parle ainsi d'effet pouzzolanique.

Stéréotomie: science de la découpe de la pierre taillée qui exige une bonne maîtrise de la géométrie.

Tirant: barre en fer ou en bois qui transmet un effort de traction.

Trass: cendre volcanique trouvée dans l'Eiffel ayant le même effet sur le mortier que le pouzzolane. Ce matériau arrivait à Bruxelles par voie d'eau, descendant le Rhin pour remonter l'Escaut et ensuite la Senne.

Voûtain: remplissage en pierre ou en briques de la surface d'une voûte gothique située entre les arcs

COMITÉ DE RÉDACTION

Jean-Marc Basyn, Stéphane Demeter,
Paula Dumont, Cecilia Paredes et Brigitte
Vander Bruggen avec la collaboration d'Anne-
Sophie Walazyc pour le Cabinet du Ministre-
Président chargé des Monuments et Sites.

COORDINATION DE PRODUCTION

Koen de Visscher

RÉDACTION

Dossier : Patrick Burniat, Bernard Espion,
Odile De Bruyn, Rika Devos, Benoît Fondu,
Pierre Halleux, Leen Lauriks, Géry Leloutre,
Piet Lombaerde, Michel Provost, Véronique
Samuel-Gohin, Joris Snaet, Elisabeth Van Besien,
Ine Wouters

Plus : David Attas, Paula Dumont, Michel Provost,
Brigitte Vander Bruggen.

TRADUCTION

Gitracom

RELECTURE

Elisabeth Cluzel et le comité de rédaction.

GRAPHISME

supersimple.be

IMPRESSION

Dereume Printing

REMERCIEMENTS

Philippe Charlier, Julie Coppens, Marcel Vanhulst

ÉDITEUR RESPONSABLE

Philippe Piéreuse, Direction des Monuments
et des Sites de la Région de Bruxelles-Capitale,
CCN - rue du Progrès 80, 1035 Bruxelles

Les articles sont publiés sous la responsabilité
de leur auteur. Tout droit de reproduction,
traduction et adaptation réservé.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

La majorité des documents ont été fournis par
les auteurs et proviennent de diverses collections
(références mentionnées à chaque illustration).

*Malgré tout le soin apporté à la recherche
des ayants droit, les éventuels bénéficiaires
n'ayant pas été contactés sont priés de se
manifester auprès de la Direction des Monuments
et des Sites de la Région de Bruxelles-Capitale.*

IMAGE DE COUVERTURE

Palais 5 (Brussels Expo)
(Chr. Bastin & J. Evrard © MRBC)

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AAM - Archives d'Architecture Moderne
ARB - Académie royale de Belgique
AVB - Archives de la Ville de Bruxelles
IRPA - Institut royal du Patrimoine artistique
KBR - Koninklijke Bibliotheek van België /
Bibliothèque royale de Belgique
MRAH - Musées royaux d'Art et d'Histoire
MRBAB - Musées royaux des Beaux-Arts de
Belgique
MRBC - Ministère de la Région de Bruxelles-
Capitale - Centre de Documentation de
l'Administration du Territoire et du Logement
MVB - Musées de la Ville de Bruxelles
SPW - Service public de Wallonie
ULB - Université libre de Bruxelles

ISNN

2034-578X

DÉPÔT LÉGAL

D/2012/6860/12

**Dit tijdschrift verschijnt ook in het Nederlands
onder de titel *Erfgoed Brussel*.**