



2002 - 2003

La compréhension de la pensée technique des bâtisseurs médiévaux : un long cheminement du 12^e au 21^e siècle

Prof. dr. ir. Pierre Halleux



Icomos Wallonie - Bruxelles a déjà annoncé son projet d'un voyage d'études en Picardie dont les visites principales seraient axées sur deux grandes cathédrales gothiques, Saint-Pierre de Beauvais et Notre-Dame d'Amiens.

La première, connue par ses deux accidents de 1284 et 1573, conserve, avec 48 m, le record absolu de hauteur à la clé de voûte. La seconde est inscrite sur la liste du Patrimoine Mondial de l'UNESCO, non parce que c'est la plus grande cathédrale de France, mais pour son architecture exceptionnelle, et en particulier pour ses portails sculptés dont les vestiges retrouvés de polychromie ont permis une mise en valeur nocturne par projection de couleurs virtuelles.

Si les historiens et les historiens

de l'art se sont largement penchés sur cette architecture exceptionnelle du Moyen-Âge, bien des études sérieuses restent sujettes à interrogations, en raison en autres

- de lacunes dans l'observation directe approfondie des édifices eux-mêmes, seulement possible avec de grands échafaudages indisponibles ou presque.

- de la rareté des archives dont certaines, cependant particulièrement précieuses et complètes, ne sont encore ni mises à la disposition du public ni même entièrement dépouillées.

- et enfin de questions techniques qui restent posées quant à la conception même et à la construction de ces édifices, tant au point de vue des échecs encourus que des succès qui forcent aujourd'hui encore notre admiration.

L'Université de Gand a attribué, pour l'année académique 2001-2002, la Médaille George SARTON* de sa Chaire d'Histoire des Sciences à Pierre HALLEUX, professeur émérite et directeur honoraire de l'Institut des Constructions Civiles à l'Université de Bruxelles, pour l'ensemble de son apport à la compréhension de la construction médiévale.

Lors de la séance académique de remise de la Médaille, le 21 février 2002, le lauréat a présenté une leçon intitulée "La compréhension de la pensée technique des bâtisseurs médiévaux, un long cheminement du 12e au 21e siècle".

Le texte de cette leçon, publié par l'Université de Gand dans le volume SARTONIANA 15, 2002, nous a semblé une introduction adéquate au voyage

d'étude projeté par ICOMOS Wallonie - Bruxelles, montrant combien la compréhension de ces édifices gothiques est difficile, délicate et encore imparfaite.

Nous remercions la Chaire George SARTON d'Histoire des Sciences de l'Université de Gand qui nous en a permis la reproduction intégrale.

George SARTON (1884-1956) est un ancien étudiant de l'Université de Gand qui a mené, aux Etats-Unis, une carrière de renommée internationale dans l'Histoire des Sciences.

1. INTRODUCTION

Parmi les œuvres des bâtisseurs du Moyen-Age, à côté d'édifices romans d'une beauté reconnue et d'ouvrages défensifs prestigieux, l'essor du gothique constitue une étape marquante de l'histoire de l'architecture.

L'audace de ces constructions continue à forcer l'admiration tant des touristes, des historiens de l'art que des bâtisseurs d'aujourd'hui; du point de vue technique, il est clair que de pareilles réalisations exigeaient un savoir, ou plutôt un savoir-faire hors du commun.

En dehors de considérations de l'histoire de l'art qui sortent du cadre de la présente étude, nous nous proposons ici, dans l'esprit de l'ingénieur :

- de rappeler brièvement, du point de vue de la Stabilité des Constructions, en quoi le gothique, caractérisé par sa croisée d'ogives, est un principe constructif particulièrement original, qui répond bien aux besoins économiques et sociaux du moment
- de faire l'inventaire des notions nécessaires à la compréhension du fonctionnement mécanique de ces édifices pour constater qu'elles sont apparues seulement, de façon progressive, au cours des siècles qui ont suivi le Moyen-Age dont les constructions ont été élevées par empirisme, intuition et transmission à la génération suivante du savoir-faire acquis;
- de voir quel est l'état actuel de nos connaissances sur le sujet après les études du dernier quart du 20e siècle qui ont été particulièrement productrices en la matière ;
- de constater que la compréhension de ces édifices gothiques, encore loin d'être achevée, ouvre de nouvelles perspectives de recherche pour le 21e siècle ;
- de conclure à l'extraordinaire intuition de ces maîtres-maçons qui ont pu, sans l'outil scientifique nécessaire à leur compréhension, nous laisser de pareils chefs-d'œuvre.

2. LA VOÛTE GOTHIQUE, SES ANTÉCÉDENTS, SA GENÈSE, SON PRINCIPE

Jusqu'au 12e siècle, le style roman s'inspire d'un modèle issu de l'époque romaine qui s'est dégradé au cours du temps. L'auteur du vocable "roman" l'archéologue français Charles de GERVILLE, lui donne au début du 19e siècle une connotation péjorative en exprimant son mépris pour une architecture qu'il qualifie de lourde et grossière, et que plus tard seulement l'histoire de l'art appréciera.

On peut conventionnellement fixer l'apparition du style gothique à 1140 environ, avec l'introduction dans le chœur de l'abbatiale de Saint-Denis des voûtes sur croisée d'ogives qui en sont la signature (fig.1). Ici aussi, l'auteur du terme "gothique", le peintre et architecte italien Giorgio VASARI (1511-1574), y met au départ un sens péjoratif: il s'agit d'une architecture de barbares, et cette acception méprisante va durer jusqu'à la fin du 18e siècle.

Pour la construction d'un édifice religieux, on va d'abord exploiter le schéma basilical romain, une nef couverte d'une toiture à double versant de pente assez faible et deux bas-côtés dont la couverture est, elle aussi, peu inclinée.

Tant pour l'esthétique que pour le confort - la

toiture peu étanche laisse passer les courants d'air et fait tirage par où s'échappe la moindre chaleur – on va ajouter un plafond plat qui subsistera longtemps. Ainsi la nef romane de la cathédrale de Tournai a-t-elle conservé son plafond jusqu'au voûtement tardif du 18e siècle.

Lorsque la taille de l'édifice s'accroît, la hauteur des murs de la nef augmente, alors que l'emploi, à l'époque romane, de pierres de petit appareil qui multiplient les joints de mortier n'est pas favorable à l'obtention d'une bonne stabilité avec de grands élancements: l'adjonction d'une galerie à l'étage des bas-côtés viendra conforter les murs tout en offrant un accroissement de la surface utile de l'édifice.

Vient alors l'idée d'un voûtement en dur, pierres ou briques selon les régions. Peut-être s'agit-il d'un sentiment de plus grande durabilité: on construit pour longtemps sinon pour l'éternité, et la maçonnerie semble alors préférable au bois, ce qui n'est en réalité pas nécessairement vrai, car une charpente de bonne qualité, bien aérée, peut se conserver impeccablement pendant des siècles.

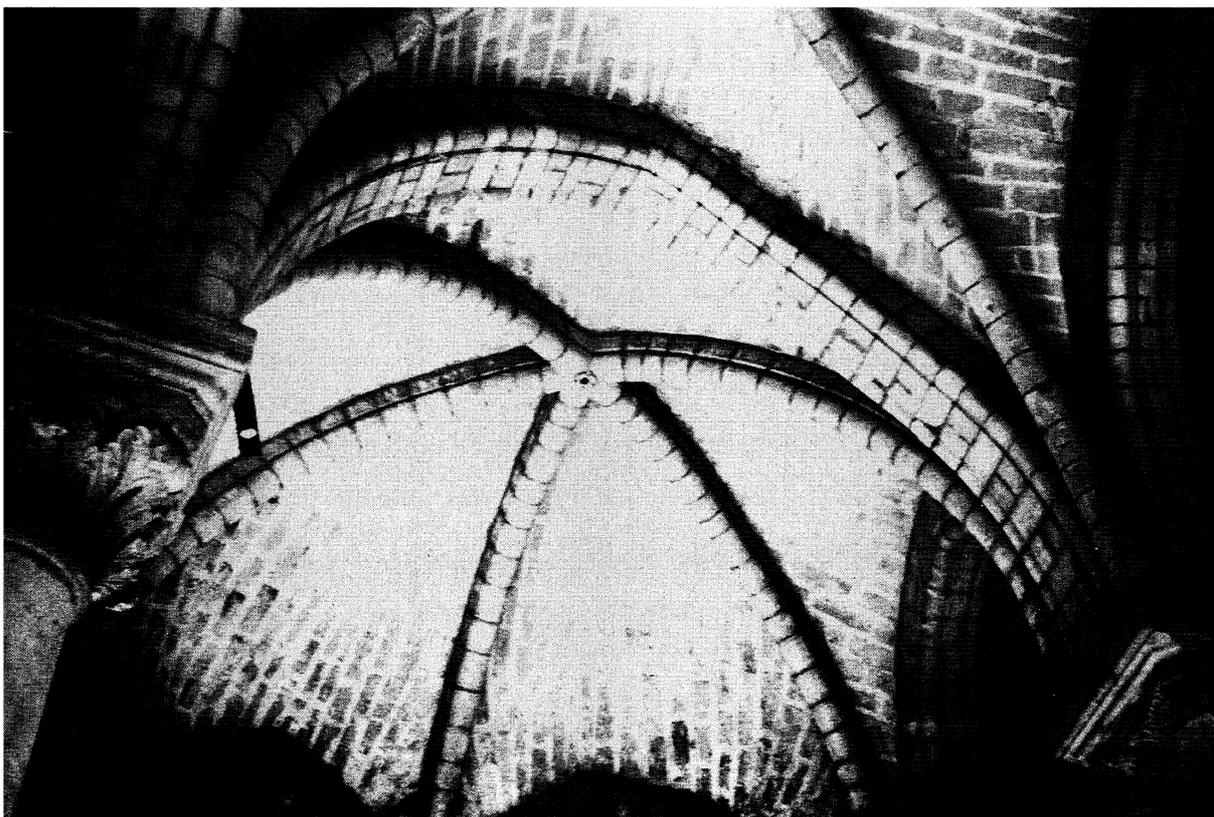


Fig.1 Le premier voûtement gothique sur croisée d'ogives apparaît vers 1140 et subsiste dans le déambulatoire à Saint-Denis.

L'objectif d'une meilleure acoustique - chants grégoriens, sermons qui accompagnent les offices - reste à établir car la résonance de la voûte n'est pas nécessairement favorable à une meilleure intelligibilité des paroles.

D'un point de vue beaucoup plus pragmatique, la voûte maçonnée constitue surtout une protection efficace contre l'incendie: quand le feu prend dans un édifice non voûté, il ne reste rien, car la formidable charge combustible de poutres incandescentes qui s'effondrent dans la nef calcine les pierres, et les pans de murs qui subsistent sont bons à abattre. L'histoire de nos cathédrales est jalonnée d'un nombre incroyable d'incendies dus à la foudre, à l'imprudance des plombiers, à l'éclairage à flamme nue par cierges et torches, et aux feux de cheminée ou incendies des petites maisons voisines, souvent disparues aujourd'hui, qui étaient accolées à l'édifice.

Des exemples plus récents d'incendies où la voûte a sauvé l'édifice sont encore présents à la mémoire, tels celui de la superbe charpente de Chartres qui part en fumée en 1836, celui de la cathédrale de Reims touchée par l'artillerie lors de la première guerre mondiale et celui de la nef romane de Tournai frappée par les bombes incendiaires en 1940.

Le voûtement maçonné est donc bien justifié.

La formule classique de couverture de l'époque romane est la voûte en berceau, demi-cylindre en maçonnerie.

Une voûte exerce sur ses appuis des charges verticales qui correspondent à son poids et des forces horizontales vers l'extérieur appelées poussées au vide, qui résultent de la tendance de la voûte à s'aplatir, à s'ouvrir. Toutes autres choses égales, les poussées au vide augmentent lorsque la voûte est surbaissée et diminuent si elle est surhaussée: les voûtes elliptiques et en anse de panier poussent plus que la voûte demi-circulaire, qui elle-même pousse plus que l'arc pointu.

La voûte cylindrique en berceau exerce donc des poussées au vide substantielles qui ont l'inconvé-

nient de se répartir sur toute la longueur des naissances: il faut donc des murs épais pour supporter cette sollicitation, et c'est pourquoi aussi les fenêtres autorisées dans l'architecture romane sont de taille restreinte.

Les arcs de renforcement en pierre que l'on dispose ici et là le long de la voûte ne sont guère utiles car le surcroît de résistance qu'ils offrent se trouve absorbé par l'accroissement de sollicitation dû à ce poids additionnel.

Les contreforts que l'on construit à l'extérieur des murs, pour aider à reprendre la poussée au vide de la voûte qui tend à les faire basculer, sont des points d'appui localisés, de même d'ailleurs que les éventuels tirants qui relient les naissances de la voûte; supports ponctuels, ils conviennent mal, puisque la poussée au vide s'exerce de façon répartie sur toute la longueur de la voûte; on va la ramener vers ces appuis localisés par l'intermédiaire de longues poutres en bois noyées dans la maçonnerie aux naissances de la voûte. Hélas, ce bois qui n'est pas aéré va pourrir et mettre en péril la pérennité du système.

Lorsqu'on veut accroître la taille de l'édifice, non seulement la poussée au vide augmente avec les dimensions de la voûte, mais le bras de levier de cette force, hauteur du mur de la nef depuis sa base jusqu'à la naissance de la voûte, évolue de même, ce qui multiplie l'intensité de la flexion en base de mur et requiert une surépaisseur considérable de la maçonnerie, c'est-à-dire un accroissement correspondant du cubage de matériau consommé.

A une époque où des chariots lourdement chargés de pierres et tractés par des bœufs s'embourbent vite dans des chemins mal entretenus, où la multiplicité des péages rend le transport prohibitif, allant jusqu'à parfois multiplier par sept le prix du matériau entre le départ de la carrière et l'arrivée au chantier, l'accroissement considérable du volume de matériaux requis pour agrandir l'édifice roman est mal venu.

Nous sommes en présence d'une barrière technique difficile à franchir sans un changement radical du mode constructif. Ainsi, dans sa troisième version,

l'abbatiale de Cluny voit sa voûte, qui atteint le record pour la période romane de 29 mètres à la clé, s'effondrer en 1125 peu après sa construction, ce qui marque la fin, au niveau technique de l'architecture romane.

Une amélioration restreinte est celle de la voûte dont la section n'est plus un demi-cercle mais un arc pointu, en ogive. On peut se demander s'il s'agit d'une affaire de mode, d'esthétique, car les bâtisseurs du moment ne disposaient pas des notions de mécanique permettant de comprendre que l'arc pointu exerce une poussée au vide moindre que l'arc circulaire, et ils ne pouvaient au mieux que le pressentir. Ici, le mode constructif suit toujours le principe de la voûte romane en berceau, et l'arc pointu seul n'est pas encore du gothique. La poussée au vide de la voûte reste d'ailleurs considérable et le sérieux déversement des piliers de la cathédrale d'Autun en est un témoignage.

Nous passerons rapidement sur la voûte d'arête, constituée par l'intersection de deux voûtes cylindriques permettant de couvrir un espace carré en reportant les zones d'appui aux quatre coins. Connue à la période romaine où elle était réalisée dans le bon agrégat de l'époque, abusivement considéré comme béton, et oublié au Moyen-Age, elle pose des problèmes si elle doit être réalisée en pierres appareillées apparentes car chaque élément des diagonales demande une taille individuelle pour laquelle les connaissances en stéréotomie du 12e siècle sont encore insuffisantes.

On peut bien sûr masquer l'arête diagonale par une nervure, mais il subsiste la difficulté que l'intersection de deux cylindres circulaires est un arc d'ellipse pour lequel tous les claveaux auront des rayons de courbure différents.

En réalisant par contre les arcs diagonaux en demi-cercles, le tracé au compas est simple, tous les claveaux sont identiques et cette standardisation permet la préfabrication. Pour éviter que la voûte ne retombe trop bas sur ses côtés, on transforme les arcs latéraux, doubleaux et formerets, en arcs pointus, composés chacun de deux portions de cercle offrant le même avantage de standardisation des claveaux. En couvrant les espaces ainsi délimités par des voûtains, on obtient la voûte sur croisée d'ogives qui va s'avérer être toute l'originalité du gothique (fig.2).

Les arcs diagonaux qui sont les arcs d'ogives ou arcs ogifs sont donc bien des arcs circulaires et non pointus; c'est à partir du 19e siècle que l'on va - abusivement donc - appeler ogival l'arc pointu.

Élément caractéristique de l'architecture gothique, la voûte sur croisée d'ogives va permettre le développement d'une conception structurale différente de ce qui s'était fait jusqu'alors.

La voûte repose en ses coins sur des piliers qui ne supportent en principe que les charges verticales: pour autant que la conception de l'édifice soit correcte, ils peuvent être minces et élancés, et dégagent ainsi l'espace intérieur, puisqu'ils ne sont

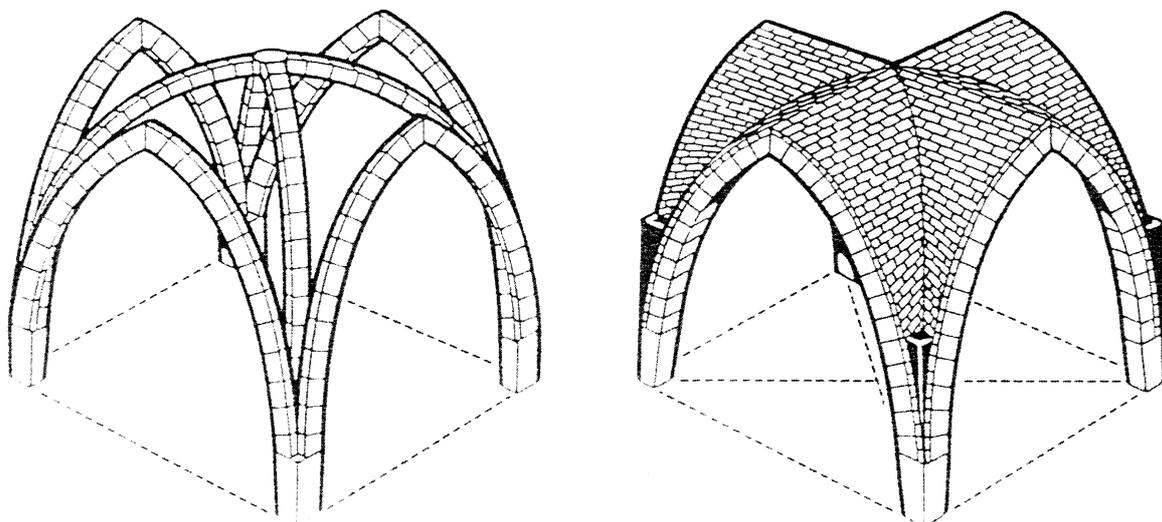


Fig. 2: Principe de la voûte sur croisée d'ogives dont les arcs diagonaux sont des demi-cercles (schéma d'après R. Bechmann).

pas ou seulement peu soumis à flexion. Ceci implique évidemment la présence d'un dispositif complémentaire pour reprendre ces forces horizontales que sont les poussées au vide de la voûte.

Au coin d'une voûte sur croisée d'ogives, la poussée au vide s'exerce, comme on le verra, à peu près suivant la direction de la diagonale. Sa composante longitudinale se trouve auto-équilibrée par la composante antagoniste développée par la voûte voisine, tandis que sa composante transversale est transmise par un arc-boutant à un contrefort situé hors de l'édifice. Si la construction comporte deux volées d'arc-boutants superposées, c'est celui de la volée inférieure qui est ici concerné (fig. 3).

L'espace intérieur ainsi bien dégagé devient disponible pour les nouvelles fonctions sociales de l'église, et les murs qui n'ont plus de rôle porteur peuvent être percés de larges baies, voire complètement supprimés, au profit des vitraux qui apporteront ainsi la lumière devenue nécessaire, qui manquait dans la construction romane.

Au-dessus de la voûte, la toiture, dont les versants maintenant plus inclinés sont à 60°, repose sur le sommet des murs gouttereaux et subit l'importante sollicitation du vent, d'autant plus que l'édifice est élevé et isolé au milieu des maisons basses de la cité médiévale. Cette sollicitation est transmise au même contrefort extérieur par l'arc-boutant de la volée supérieure (fig. 3).

Ainsi, dans un édifice à deux volées d'arc-boutants, chacune assure un rôle spécifique.

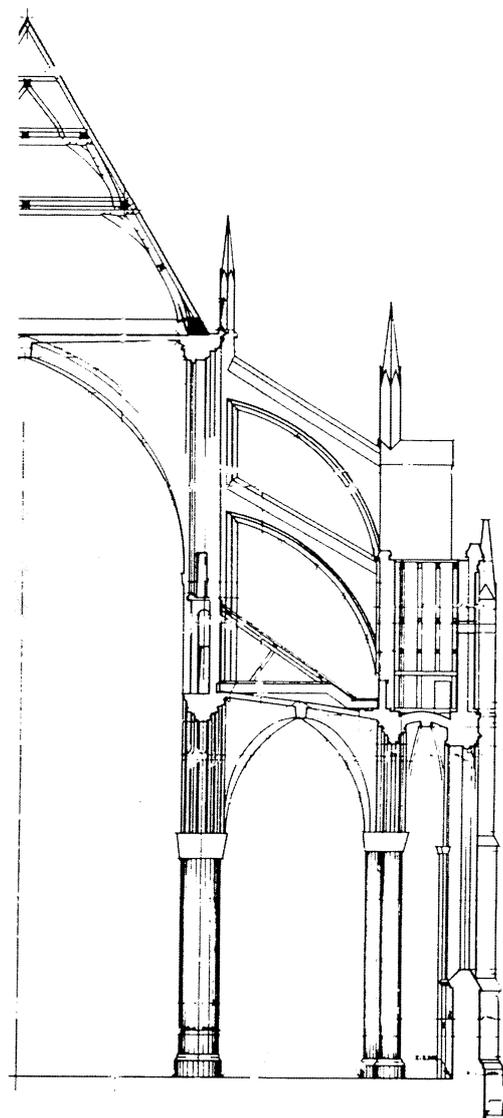
Le fonctionnement mécanique de la structure gothique présenté ici est évidemment très schématisé car la réalité est complexe, souvent mal connue et différente d'un édifice à l'autre.

C'est ainsi par exemple qu'il n'y a pas si longtemps que l'on sait que cette association nervures-voûtains qui apparaît comme une ossature porteuse avec éléments de remplissage travaille bien différemment, et que les nervures n'ont pas le rôle structural qu'on leur présentait.

Le gothique apparaît donc vers 1140 à l'abbatiale de Saint-Denis, et sa grande période créatrice du point de

vue du génie constructif dure seulement 140 ans environ, c'est-à-dire en gros jusqu'à l'effondrement du chœur de la cathédrale de Beauvais en 1284, qui peut être pris aussi comme second point de repère conventionnel. Dans les constructions gothiques ultérieures parmi lesquelles figurent encore bien des chefs-d'œuvre, le décor évolue tandis que la structure ne présente plus guère d'innovation.

Fig. 3 : Coupe d'un édifice gothique classique: les arcs-boutants supérieurs transmettent aux contreforts l'action du vent sur la toiture et les arcs-boutants inférieurs, la poussée de la voûte (cathédrale Saint-Michel à Bruxelles).



3. UNE RÉFLEXION GÉNÉRALE SUR LES CHANTIERS MÉDIÉVAUX

Même dans la forme simplifiée qui vient d'être présentée, la compréhension du fonctionnement mécanique de la structure d'une grande cathédrale gothique requiert la maîtrise d'un certain nombre de concepts.

La plupart d'entre eux feront seulement leur apparition bien après le Moyen-Age, et même s'ils nous paraissent simples, voire évidents aujourd'hui, il n'en a pas toujours été ainsi, et sans doute n'en est-il pas encore ainsi, à en juger par les difficultés rencontrées et les fautes de compréhension commises par un nombre encore non négligeable d'étudiants.

Il faudra donc conclure qu'en l'absence de connaissances qui n'apparaissent que plus tard, les bâtisseurs médiévaux ont fait preuve d'une excellente intuition et d'un savoir-faire empirique transmis de compagnon à apprenti, de chantier à chantier, et ce de génération en génération.

Mon sentiment en la matière est que le nombre d'échecs et d'accidents de chantier a été bien plus considérable qu'on ne peut le croire, et que les chefs-d'oeuvre qui nous ont été transmis ne sont en fait que les édifices qui ont, par un hasard heureux, bénéficié d'une conception et d'un dimensionnement dépourvus de fautes rédhibitoires, autant que du génie d'un bâtisseur d'exception.

L'oubli des échecs vient vite, très vite même. Dans les dix dernières années, l'effondrement de deux ouvrages d'art importants en Belgique est passé quasiment inaperçu du grand public et même d'une majorité des gens de métier. Comment s'en souviendrait-on dans huit cents ans? Dans le même ordre d'idée, les observations actuelles laissent à penser que le chœur gothique de la Cathédrale de Tournai a dû, en raison d'ennuis de fondation, être démonté et reconstruit complètement à partir du niveau du triforium un siècle après son édification, intervention lourde s'il en est qui est tombée dans l'oubli pendant plus de six siècles, pour réapparaître aujourd'hui à la faveur d'un examen approfondi in situ.

Quoi qu'il en soit, le bâtisseur médiéval a bénéficié

par hasard d'une circonstance favorable: c'est l'emploi du mortier de chaux qui réduit l'incidence des erreurs et qui corrige certains défauts pas trop graves.

En effet, contrairement au mortier de ciment portland actuel qui fait sa prise et durcit rapidement, le mortier de chaux connaît d'abord une phase de séchage, correspondant au départ de l'eau de gâchage, à l'issue de laquelle il est encore bien plastique; ultérieurement la prise réelle par carbonatation, due au gaz carbonique contenu dans l'air, est un phénomène extrêmement lent qui peut prendre des siècles. Ainsi le mortier de chaux garde-t-il très longtemps une plasticité qui lui permet de s'adapter aux tassements et aux mouvements de l'édifice, alors qu'un joint de mortier moderne se fissurerait.

En outre, le mortier de chaux présente l'intérêt d'une auto-cicatrisation, c'est-à-dire que de fines fissures qui y apparaissent peuvent s'obturer d'elles-mêmes.

Enfin, comme le chantier progresse en général lentement, cela laisse le temps d'observer l'effet d'un défaut de conception dans une travée qui s'achève et d'effectuer d'emblée la correction voulue lors de la construction de la travée suivante.

Ainsi donc, il s'agit ici, à côté du cas des édifices qui ont disparu pour faute grave, d'un mode constructif qui s'adapte et pardonne des erreurs parfois plus que modérées.

Aujourd'hui, nous sommes en présence d'édifices qui souvent apparaissent gravement fissurés, voire distordus, et qui ne présentent pourtant pas particulièrement de danger: c'est notre vision fondée sur la théorie de l'Elasticité qui nous a maintenus jusqu'il y a peu dans une manière de penser dont il faut sortir pour saisir le comportement structural d'une maçonnerie. Les lignes de poussée possibles qui correspondent à des situations stables sont multiples, et la fissuration peut simplement indiquer que l'édifice a trouvé une nouvelle forme d'équilibre. Pour une maçonnerie de briques ou de pierres, l'état fissuré est l'état normal.

4. LES CONCEPTS NÉCESSAIRES À LA COMPRÉHENSION DE LA STRUCTURE GOTHIQUE ET LES DISCIPLINES MISES EN JEU

Quelles sont donc les matières dans lesquelles des connaissances sont requises pour comprendre la conception mécanique d'une grande structure gothique, étant entendu qu'il s'est avéré possible de mener à bonne fin un chantier parfois exceptionnel sur base de recettes et d'empirisme?

Les besoins touchent à la Géométrie, la Mécanique des Solides avec des notions d'équilibre, la Mécanique de Milieux Continus avec les concepts de contrainte, de déformation et de loi de compor-

tement, la Résistance des Matériaux qui étudie, tant du point de vue de la résistance que de celui de la déformabilité, des éléments constructifs de forme simple, la Stabilité des Constructions qui, contrairement à son intitulé, ne s'occupe pas directement de voir si une construction est stable, mais qui étudie l'interaction entre les éléments simples qui constituent une structure réelle complexe, et enfin la Connaissance des Matériaux, discipline qui investigate les propriétés mécaniques et autres des matériaux mis en œuvre.

4.1. La Géométrie

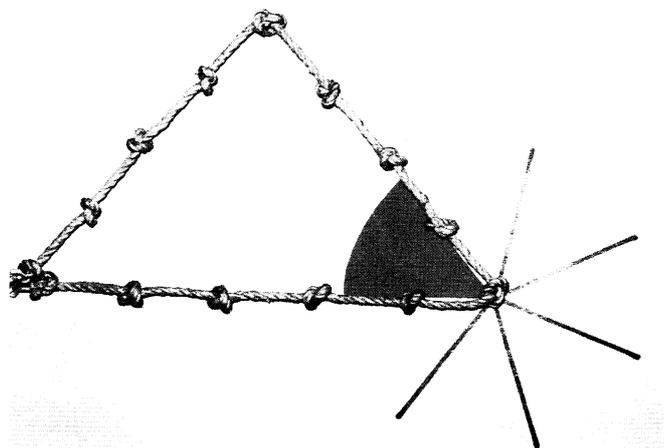
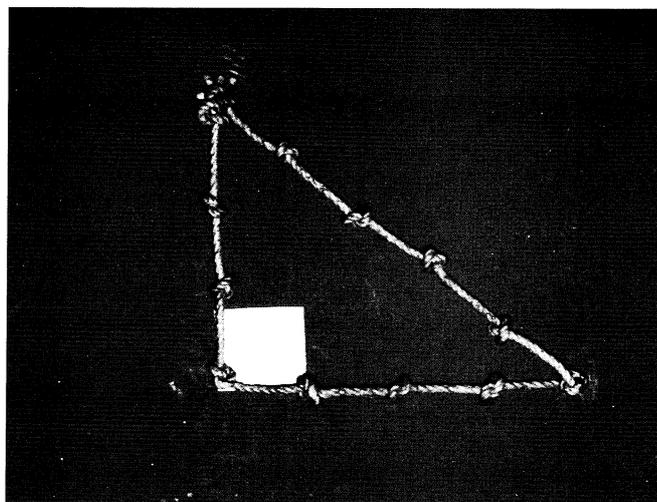
Les bâtisseurs du Moyen-Age sont incontestablement imprégnés de géométrie, discipline à laquelle ils accordent une importance sans doute excessive, dans la mesure où l'obtention d'un beau tracé qui respecte des conditions contraignantes et des conventions symboliques ne constitue en aucun cas une garantie de stabilité de l'édifice.

Au Moyen-Age, des connaissances de Géométrie, considérée ici comme branche des Mathématiques, sont disponibles, venant du monde antique, certaines ayant été traduites du grec en arabe, pour transiter par l'Espagne avant d'être retraduites de l'arabe en latin. Ces connaissances sont l'apanage d'un nombre restreint de lettrés, et il est hautement improbable qu'elles aient été accessibles aux gens de terrain qu'étaient nos bâtisseurs.

Il faut plutôt considérer que les connaissances des hommes de chantier relèvent d'une géométrie empirique, voire expérimentale.

L'usage de la corde à nœuds en est un exemple, avec la série de nœuds équidistants qui déterminent un ensemble de tronçons identiques et permettent de construire des figures simples de proportions préétablies. Ainsi, la réalisation d'un triangle dont les côtés ont respectivement trois, quatre et cinq unités reproduit le théorème de Pythagore ($3^2 + 4^2 = 5^2$)

Fig. 4 : La corde à nœuds permet de construire sur le terrain un angle droit (triangle 3-4-5, théorème de Pythagore) et l'angle de l'étoile à sept branches (triangle 4-4-5).



et donne donc un triangle rectangle, ce qui permet de construire un angle droit ou de vérifier l'orthogonalité de deux murs. Ce procédé simple peut être utilisé de façon empirique sans qu'il soit nécessaire de connaître le théorème de Pythagore (fig.4).

Avec la même corde à nœuds, la construction d'un triangle isocèle dont la base est de cinq unités et les côtés égaux de quatre unités donne un angle à la base qui est à peu de chose près le septième de la circonférence; l'écart est suffisamment faible pour que, au degré de précision requis sur chantier, cette construction puisse servir au tracé d'une étoile à sept branches que l'on rencontre dans la symbolique médiévale.

R. Bechmann souligne à juste titre que l'usage d'une règle empirique comme celle du théorème de Pythagore évoquée ici est réductrice de la pensée, et il évoque le souvenir d'un chantier en Afrique du Nord où l'ouvrier s'avérait incapable de vérifier l'orthogonalité de deux cloisons car le local trop petit ne lui permettait pas de construire son triangle 3-4-5, ne pouvant comprendre que le même principe aurait pu être exploité avec un triangle plus petit. Nous avons rencontré un cas similaire lors de la rénovation de l'Institut des Constructions Civiles de l'ULB, au début des années 1990, lorsque le contremaître ne pouvait admettre l'évidence visuelle que deux murs n'étaient pas perpendiculaires.

Certes, les grands édifices religieux de l'époque gothique ont-ils été construits en tenant compte de règles géométriques conventionnelles ou, plus souvent, chargées d'une signification symbolique. Que leurs bâtisseurs aient pu croire que cela suffirait à assurer la stabilité de leurs édifices est évidemment une erreur, et nous ne nous y attarderons pas.

Mais les tracés géométriques frappent l'imagination, et à côté d'études sérieuses sur la question que nous n'abordons pas non plus, la multiplication d'ouvrages à sensation, misant sur la révélation de mystères pour accroître le tirage, et qui rencontrent effectivement l'engouement du public, appelle une réflexion de bon sens.

Les bâtisseurs médiévaux ne nous ont pas laissé d'écrits qui explicitent leurs intentions en matière de géométrie symbolique. Entre ce qu'a projeté l'architecte de l'époque et ce qui a été réalisé apparaissent

probablement déjà des écarts substantiels, en raison de contingences de chantier telles que le réemploi de substructions existantes d'un édifice précédent, le relief du terrain, les expropriations refusées, la présence d'un rempart qui limite l'extension possible du bâtiment,...

Le positionnement en plan de l'édifice sur le terrain est bien sûr rendu difficile par l'exécution exigée en phases successives, tant pour des raisons budgétaires que pour conserver sur place l'exercice du culte: par exemple, on détruit l'ancien chœur roman pour édifier le chœur gothique avant de s'attaquer à la reconstruction de la nef, de sorte que l'on ne se trouve jamais devant un espace dégagé comme un terrain de football où l'on pourrait planter des jalons, ce qui peut expliquer des erreurs aléatoires d'alignement autrement que par la symbolique de la tête du Christ inclinée sur la croix.

En outre, c'est sans compter aussi que, sur les grands chantiers, l'architecte dispose d'un intermédiaire, d'une sorte de contremaître qui peut distordre involontairement la pensée géométrique initiale: c'est le "parlier", c'est-à-dire celui qui parle aux ouvriers, qui transpose en mots simples les instructions du maître, voire qui les traduit au sens littéral du terme dans leur langue ou dans leur patois local quand l'architecte renommé a été appelé de l'étranger.

De plus, l'architecte est un homme fort occupé qui gère souvent plusieurs chantiers et ne suit pas de suffisamment près l'exécution sur le terrain. Ainsi, l'exigence d'une présence exclusive à Bruxelles pour l'édification de la grande tour de l'hôtel de ville, imposée par les échevins à l'architecte Van Ruysbroeck, en est un témoignage.

Après les discordances entre ce qui est voulu et ce qui est réalisé viennent les distorsions progressives de l'édifice, principalement en élévation, dues à des mouvements de terrain, à la déformation plastique du mortier de chaux dont les tassements durent des siècles, ainsi qu'au fluage, d'incidence beaucoup moindre ici, des pierres utilisées.

Pour rechercher une intention de nature géométrique de la part de l'architecte, la situation en

plan, au niveau du sol, peut servir sous réserve: ainsi, comme bien d'autres, l'architecte Bruno RENARD utilise-t-il au milieu du siècle dernier une travée "standard" de la cathédrale de Tournai pour établir son tracé géométrique alors que toutes les travées ont des largeurs sensiblement différentes, variant, au niveau du sol, de 11,31 m à 13,02 m soit un écart de 15%. Les relevés d'élévation devraient, quant à eux, être corrigés, tant les changements de géométrie ont pu être importants au cours des siècles, des hors-plomb de piliers de 80 cm étant courants dans bien des édifices.

Les interprétations géométriques d'aujourd'hui, dont un trop grand nombre manifeste un caractère trop superficiel, se basent généralement sur les relevés disponibles, pas toujours fiables, du 19^e siècle, car il est frappant de constater que trop rares sont les édifices qui ont bénéficié d'une topographie et d'un relevé photogrammétrique récents. Pour la grande tour de l'hôtel de ville de Bruxelles, nous disposons au début de la restauration en 1989 des plans dressés lors de la restauration précédente, en 1895-97, et pour la cathédrale de Tournai en 1993 de ceux de Bruno RENARD datant de 1850.

D'une manière générale on constate que, pour les grands édifices, les relevés sérieux qui, même avec les techniques modernes, restent longs, difficiles, et coûteux, sont encore l'exception aujourd'hui.

A côté de cas où leur démonstration est indiscutable, les tracés géométriques dans lesquels des auteurs, souvent convaincus, et parfois à la recherche de sensationnel, découvrent un symbolisme souffrent de deux critiques substantielles:

- Souvent, ils intègrent des modifications subies par l'édifice, bien postérieures au Moyen-Âge, principalement dans la foulée de la pensée de VIOLLET-LE-DUC, d'une création néogothique injustifiée et non fondée sur des éléments archéologiques probants;
- Pour la plupart, ils sont réalisés au départ de plans et coupes publiés à petite, voire à très petite échelle, de sorte que les erreurs du document initial, accrues par la distorsion du support papier

sensible à l'hygrométrie, permettent toujours, en trichant avec l'épaisseur du trait de crayon, de faire passer le triangle équilatéral, ou toute autre figure, par où le raisonnement présupposé en a besoin! Rappelons que sur le plan d'une cathédrale de 100 m de long, figuré par un dessin de 10 cm sur une page de l'ouvrage publié, l'épaisseur de 0,5 mm du trait de crayon représente un écart de 50 cm.

En conséquence, si nous sommes intimement convaincus que la pensée des bâtisseurs médiévaux est imprégnée de règles géométriques, sujet sur lequel des travaux sérieux existent aujourd'hui, il reste de trop nombreux cas où la reconstitution de cette pensée géométrique demande l'aval d'études exemptes des nombreux a-priori qui semblent manifester des difficultés à laisser de côté, pour intégrer les multiples sources d'incertitude qui viennent d'être mentionnées. Cette reconstitution de la pensée géométrique est bien sûr de l'ordre du possible, non du certain, et nous suggérons pour cela une terminologie nouvelle, celle de "géométrie probabiliste".

4.2. La Mécanique

Après la géométrie vient la Mécanique. On fera la distinction entre Mécanique du Solide rigide d'une part, qui fait essentiellement ici intervenir des notions d'équilibre et un peu de cinématique, et qui permet à elle seule de comprendre déjà beaucoup du comportement de nos édifices gothiques, et d'autre part la Mécanique des Milieux continus, déformables, avec les concepts de tenseur des contraintes, tenseur des déformations et lois de comportement qui sont les relations entre contraintes et déformations, faisant si nécessaire intervenir des paramètres tels que temps (durée), température, humidité, ... Les premiers développements sérieux n'en apparaîtront qu'au 19^e siècle avec la Théorie de l'Elasticité, alors qu'une bonne modélisation de la maçonnerie de pierres ou de briques exige des représentations non-linéaires difficiles que l'on essaye seulement d'obtenir aujourd'hui.

Une simple descente de charges comme on la conçoit depuis longtemps, même limitée à un cas plan, implique de comprendre la composition et la décomposition des forces par la règle élémentaire du parallélogramme, et celle-ci ne sera introduite qu'au début du 17^e siècle par Simon STEVIN (1548-1620).

Dans la structure d'une cathédrale, les différentes forces mises en jeu interviennent avec leurs bras de levier, et la notion de moment d'une force, nécessaire à la compréhension claire des équilibres et des questions de flexion, n'apparaît qu'en 1725 dans un mémoire posthume de Pierre VARIGNON (1654-1722).

Cette notion de moment d'une force, la force multipliée par son bras de levier, qui conduit à l'équilibre de rotation d'un objet pour lequel la somme des moments doit être nulle, semble bien simple au mécanicien d'aujourd'hui, et pourtant...

Pour illustrer cette difficulté de compréhension, nous prendrons ici un exemple simple d'application dans un engin de levage bien indispensable et largement utilisé au Moyen-Age pour hisser au sommet de la cathédrale en construction les grosses pierres et les lourds éléments de charpente de la toiture: c'est la cage d'écureuil.

Représentée sur différents reliefs romains, cette cage d'écureuil est connue depuis l'antiquité, et restera en service jusqu'à une époque bien tardive, puisqu'un dispositif de ce type, mû ici par un chien dans une ferme du 19^e siècle pour battre le beurre, est encore exposé au musée du folklore de Tournai.

Le principe de fonctionnement est le suivant: un homme marche à l'intérieur d'une grande roue en bois de plusieurs mètres de diamètre qu'il fait tourner pour bobiner sur son moyeu le câble de levage. En négligeant les frottements dans le système, le poids de l'individu de 80 kg avec un bras de levier de 1,50 m permet d'équilibrer une charge de 600 kg suspendue au bord du moyeu de 40 cm de diamètre, soit un bras de levier de 20 cm: l'engin doit donc permettre pratiquement de lever des charges de l'ordre de 500 kg.

Des roues de ce type ont été, entre autres, conservées aux cathédrales de Beauvais et de Strasbourg. En utilisant des roues plus grandes et plusieurs hommes, voire des roues jumelles, des charges plus considérables ont pu être levées, et on trouve même sur des représentations iconographiques anciennes de véritables grues pivotantes basées sur ce principe.

Ces différents engins sont bien illustrés par Breughel l'Ancien dans l'une de ses deux versions du chantier de la Tour de Babel, la plus belle sans doute, et qui est l'un des chefs-d'œuvre du Musée de Vienne (1563).

Dans cette oeuvre, on trouve une cage d'écureuil simple, utilisée comme treuil, et ...qui ne peut pas fonctionner! Ici, la mauvaise représentation du système mécanique témoigne de l'incompréhension, même seulement intuitive, de ce concept de moment des forces, car le câble s'enroule autour du tambour et non du moyeu, de sorte que la charge à lever agit avec un bras de levier environ double de celui de l'homme qui marche dans la cage et qui ne peut dès lors lever qu'un fardeau bien nettement inférieur à son propre poids.

Breughel aurait-il donc été mauvais observateur, car le système était bien en service à son époque? Nous y reviendrons.

En tout cas, la compréhension du fonctionnement d'un tel engin est peut-être moins évidente qu'il n'y paraît, car la même erreur de représentation qui figure le câble enroulé autour du tambour plutôt que du moyeu se retrouve aujourd'hui dans des publications dont la qualité et le sérieux sont par ailleurs certains (par exemple D. Macaulay 1974, M. Peyramaure 1991, A. Erlande-Brandenburg 1992, R. Bechmann 1995, C. Wenzler 2000).

Ces auteurs sont parmi les meilleurs spécialistes du Moyen-Age, et ont sans doute laissé passer cette erreur de dessin, comme il en subsiste toujours dans toute étude largement documentée.

Quant à Breughel qui, lui, a peut-être eu l'occasion de voir fonctionner un tel engin, le rendu du détail de ses œuvres est tellement méticuleux que l'on a peine à croire à une observation trop hâtive, et je voudrais avancer ici l'hypothèse d'une confusion.

En effet, le système d'enroulement du câble sur le moyeu donne une position d'arrivée assez instable de la charge, en raison de la forte inertie du tambour qu'il faut freiner pour arrêter le mouvement quand la charge atteint exactement le niveau souhaité, celui-ci devant être ensuite maintenu pendant le déchargement. A l'époque romaine, le freinage était obtenu par un deuxième câble qui passait, lui, sur l'extérieur du tambour, comme le montre le relief funéraire de la famille des Haterii conservé au Musée du Vatican (J.P. Adam 1984). On peut imaginer que le même procédé ait subsisté au Moyen-Age et influencé la représentation erronée de Breughel qui aurait confondu câble porteur et câble de freinage.

Comme quoi, la notion de moment d'une force n'est pas aussi évidente qu'il y paraît.

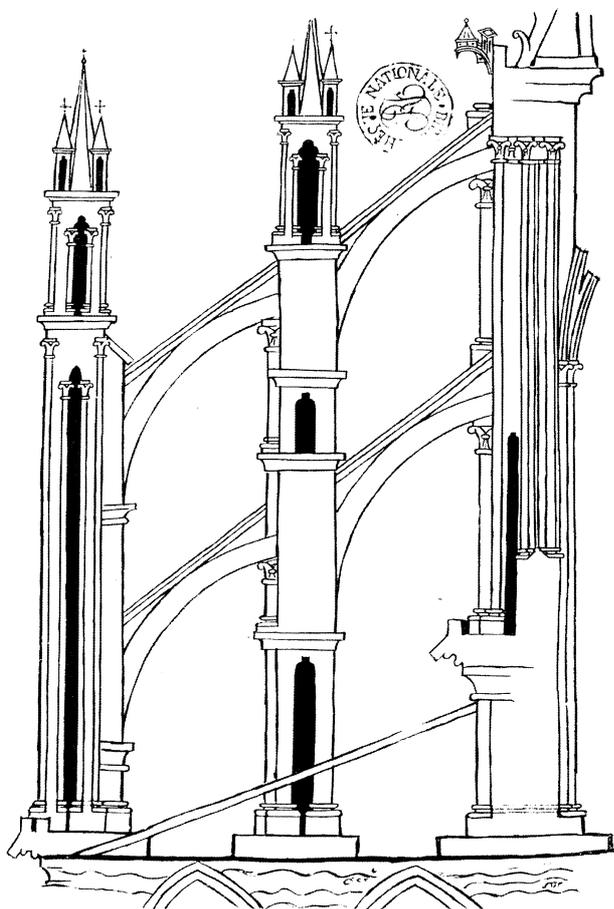
Un principe élémentaire de mécanique, dont l'application se rencontre dans l'équilibre de multiples éléments d'une cathédrale gothique, est celui de l'égalité de l'action et de la réaction.

S'il peut paraître aller de soi, mon expérience d'enseignant d'aujourd'hui me montre qu'il pose encore pas mal de problèmes aux étudiants et n'est donc pas non plus aussi évident qu'il le semble.

C'est à NEWTON (1642-1727) qu'on le doit, et il est donc bien postérieur au Moyen-Age. Il permet par exemple de comprendre, plutôt que de concevoir intuitivement, le fonctionnement d'un arc-boutant: la voûte exerce, tant directement que par l'arc-doubleau et les ogives, une action vers l'extérieur qui est exactement, à la fraction près reprise en flexion par le pilier, équilibrée par la réaction antagoniste vers l'intérieur de l'arc-boutant.

Mais la difficulté de compréhension existait bien sûr déjà au Moyen-Age. On en trouve une illustration dans les carnets de VILLARD DE HONNECOURT, manuscrit daté de 1235 environ, et conservé à la Bibliothèque Nationale de Paris.

Fig. 5 : Dans les carnets de Villard de Honnecourt, la planche représentant en coupe un projet de la cathédrale de Reims situe trop bas l'arc-boutant inférieur qui doit reprendre la poussée de la voûte.



Il s'agit du carnet de notes d'un voyageur curieux plutôt que d'un architecte, car on ne retient plus aujourd'hui de preuve sérieuse qu'il ait été un professionnel de la construction. Ses dessins sont en tout cas exécutés avec précision et fidélité pour l'époque.

Au cours de ses voyages, Villard est passé à Reims alors que la cathédrale en cours de chantier n'avait pas encore reçu de voûtement; il a dû avoir connaissance d'un plan qu'il reproduit dans ses carnets, où la volée d'arcs-boutants inférieure est située beaucoup trop bas par rapport au niveau où s'exerce la poussée au vide de la voûte: si la cathédrale de Reims avait été construite suivant ce plan, elle aurait couru un risque évident d'effondrement (fig. 5).

Ainsi qu'en témoignent aussi d'autres édifices, comme le chœur gothique de Tournai, avec une première volée d'arcs-boutants bientôt surchargés, suivie de la construction plus bas de la deuxième volée dont la surcharge va suivre, quatre phases successives de tâtonnements, l'hésitation était de mise et la conception d'un contre-butement correct bien difficile.

A la cathédrale de Chartres (fig.6), que tout le monde s'accorde à considérer comme un des hauts

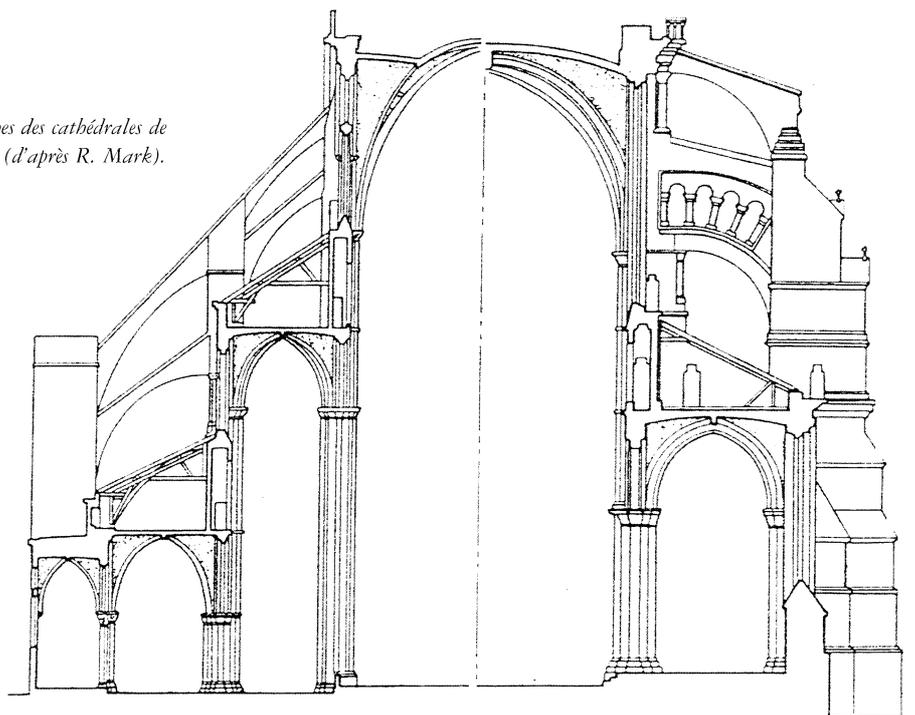
lieux de l'art médiéval, l'arc-boutant inférieur qui reprend la poussée de la voûte est dédoublé en deux arcs reliés par une série de très élégantes colonnettes, et l'arc-boutant supérieur, chargé de transmettre l'effort appliqué par le vent sur la toiture, est réduit à un frêle élément, alors que le manque d'efficacité de l'ensemble a été montré par les études de R. MARK évoquées plus loin.

Il ne faut certes pas sous-estimer la particulière difficulté constructive de cet arc-boutant inférieur dédoublé qui fait un des charmes de la cathédrale et contribue avec ses colonnettes à sa réussite esthétique.

Si toutefois l'on se place strictement du point de vue technique, cet arc dont les deux parties dédoublées sont distantes d'une hauteur de l'ordre de 6,50 m n'est-il pas à considérer comme un aveu d'incompétence, d'incapacité à situer correctement le niveau de poussée à reprendre de la voûte, niveau dont on espère bien qu'il se trouvera quelque part dans cette large fourchette de 6,50m? En tout cas, l'astuce technique imaginée pour contourner un problème dont on ne connaît pas la solution tourne ici à l'avantage esthétique de l'édifice.

Contemporaine de Chartres - les chantiers ont débuté en 1194 et 1195 - Bourges est une cathé-

Fig. 6 : Mise en regard, à la même échelle, des coupes des cathédrales de Chartres, à droite, et de Bourges, à gauche (d'après R. Mark).



drale de taille similaire, preuve que l'on pouvait faire beaucoup mieux, mais pas pour autant parfait du point de vue de l'ingénieur, à la même époque; les arcs-boutants beaucoup plus obliques ramènent de façon élégante plus directement les efforts vers la fondation et les contreforts nécessaires en deviennent fondamentalement différents: pour une efficacité identique, un contrefort pèse 1000 tonnes à Chartres et 400 tonnes à Bourges, ce qui, en raison du contexte économique et du coût du transport des matériaux, représente bien plus que la différence des quantités consommées.

A quelques menus reproches près, Bourges est le résultat d'une intuition géniale qui propose une structure d'une rare élégance. En dehors de la question d'esthétique, c'est pourtant Chartres, d'une construction plus lourde et malhabile, qui sera prise comme modèle car sa lourdeur même permet des erreurs d'interprétation alors que la copie, à une échelle différente, de Bourges requiert un savoir nouveau.

C'est la notion de loi de similitude, qui représente, quant à elle, un concept important souvent passé inaperçu et qui semble avoir peu retenu l'attention des historiens de l'architecture.

Les lois de similitude établissent les relations qui permettent de passer d'un phénomène donné à son correspondant à une autre échelle.

L'intervention de ces lois de similitude est nécessaire lorsqu'on veut, au départ d'une construction qui donne satisfaction, en réaliser une autre semblable mais de taille différente.

On conçoit directement que si l'on double les dimensions d'un édifice, on multiplie par 4 les sections résistantes des piliers, alors que le volume, et donc le poids propre, est quant à lui multiplié par 8. Avec un matériau donné dont les propriétés ne sont pas modifiées, on ne peut donc impunément accroître les dimensions d'une construction qui reste géométriquement semblable à celle de départ.

La question dépasse d'ailleurs celle de simples règles de proportionnalité: que l'on songe par

exemple à l'action du vent dont la pression est fonction du carré de la vitesse, laquelle s'accroît avec le niveau considéré par rapport au sol: la relation entre les efforts subis par deux tours de hauteurs différentes n'est pas immédiate.

Cette notion de loi de similitude n'était pas connue au Moyen-Âge, et peut-être même pas soupçonnée, à voir certains dimensionnements qui sont manifestement aberrants.

Le premier à avoir saisi ce phénomène est, semble-t-il, GALILÉE, dans un ouvrage publié à Leide en 1638: il souligne l'impossibilité de construire des bateaux, des palais ou des temples de taille énorme et fait la comparaison avec la nature qui ne peut produire des arbres gigantesques car les branches céderaient sous leur propre poids. Venant au squelette de l'homme, du cheval et d'autres animaux, il explique de façon imagée que si leur taille devait être largement accrue, cela ne pourrait se faire que par l'emploi d'un matériau plus résistant que l'os habituel ou par un agrandissement non proportionnel des sections osseuses qui conduirait à une forme et une apparence monstrueuses (fig. 7).

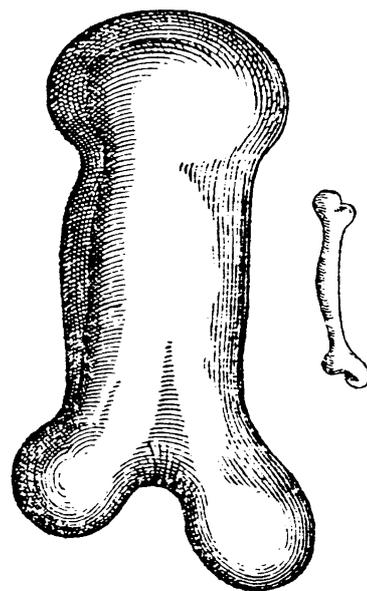


Fig. 7 : Application par GALILÉE (1638) de la notion de similitude à deux os de tailles différentes : l'augmentation d'échelle doit conduire à une forme monstrueuse.

Il faudra bien longtemps pour que cette notion soit assimilée par les bâtisseurs, et il semble bien que son ignorance soit à l'origine d'une part des problèmes rencontrés lors de la construction de l'église Sainte-Geneviève, qui deviendra le Panthéon, à Paris dans la seconde moitié du 18e siècle.

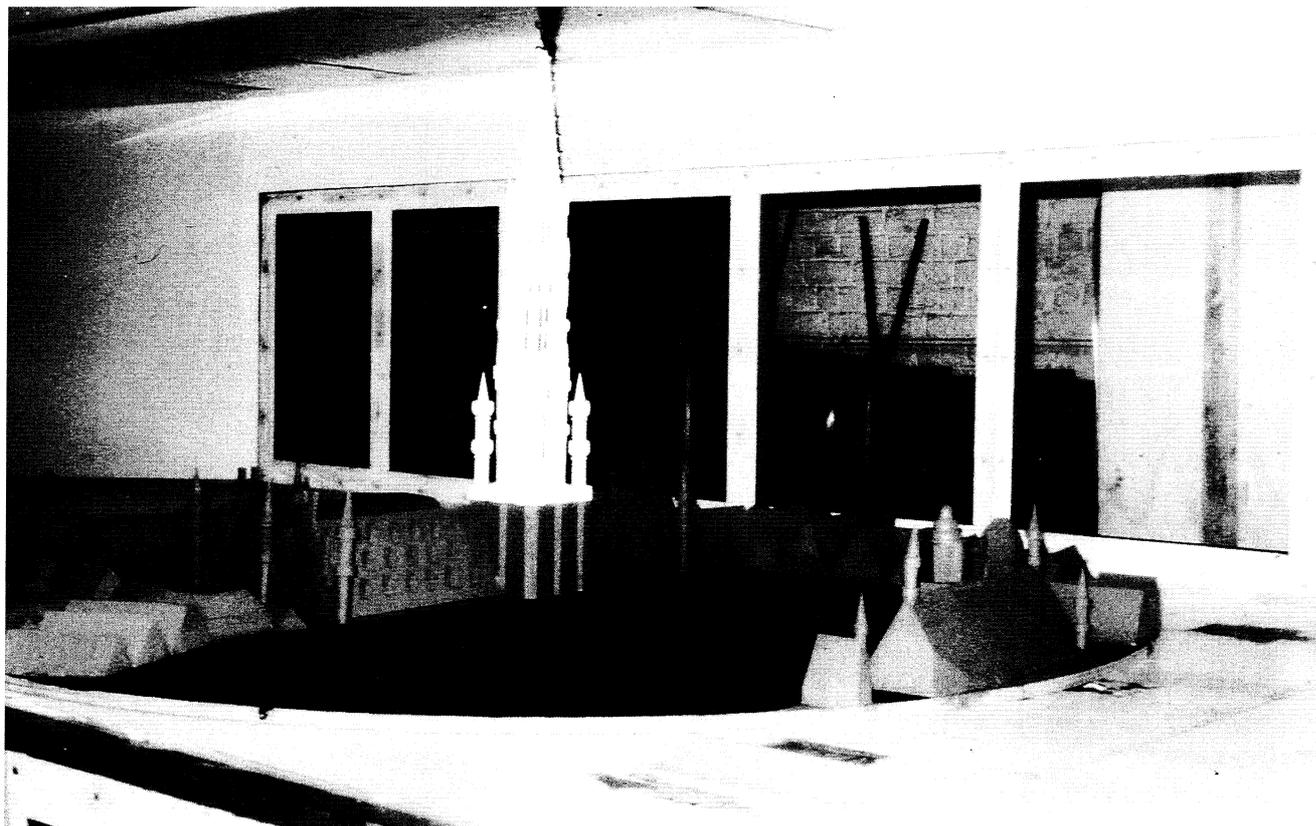
Notons au passage qu'une application importante des lois de similitude se trouve dans les essais sur modèles: on mesure les sollicitations appliquées à une maquette dans une soufflerie pour en déduire l'action du vent sur la construction réelle, on mesure les déformations d'un modèle réduit en résine pour en déduire les contraintes dans la maçonnerie de l'édifice,... Il faut donc opérer le passage d'une maquette de 75 cm à une tour de

100m, d'une matière synthétique à de la pierre, de la vitesse du vent dans le tunnel à celle à laquelle souffle une tempête.

Ces essais sur modèles restent bien utiles: il nous était par exemple impossible d'appliquer les normes actuelles pour chiffrer l'action du vent sur une dentelle de pierre comme celle de la grande tour de l'hôtel de ville de Bruxelles (fig.8).

Sans les lois de similitude, les essais sur modèles restent d'application très limitée, et il ne semble d'ailleurs pas qu'ils aient été tentés au Moyen-Age: les maquettes qui figurent dans l'iconographie et dans la statuaire avaient seulement pour fonction de visualiser pour le commanditaire, évêque ou chapitre, le projet d'architecture.

Fig. 8 : Essai sur modèle en soufflerie : maquette de la grande tour gothique de l'Hôtel de Ville de Bruxelles.



4.3. L'évolution de la théorie des constructions du 17^e au début du 19^e siècle

Nous en étions arrivés au 17^e siècle dans l'histoire de la compréhension de nos édifices gothiques.

Si Robert HOOKE (1635-1703) est surtout connu dans le monde des ingénieurs pour la "Loi de Hooke" établissant une relation linéaire entre contrainte et déformation qui est à la base de la Théorie de l'Elasticité, il semble être le premier à avoir, en 1675, noté que si l'on retourne de bas en haut le tracé d'équilibre en forme de chaînette d'un câble qui pend entre ses deux extrémités, on obtient la forme idéale d'un arc en compression pure sous son poids propre.

Avec la fin du 17^e et le 18^e siècle, on commence à avoir des idées convenables sur la mécanique des arcs; cependant, ce n'est pas pour comprendre l'architecture gothique à laquelle on ne s'intéresse plus, mais plutôt pour voûter des casemates et construire des ponts.

Philippe de LA HIRE (1640-1718), contemporain de Newton, introduit dans son *Traité de Mécanique* de 1695 le polygone des forces, qui conduit à la notion de ligne de poussée dans la descente de charges d'un arc.

C'est l'époque où l'on cherche à dépasser les recettes empiriques utilisées jusque là pour dimensionner les appuis d'une voûte, et de La Hire écrit "C'est une des plus difficiles questions qu'il y ait dans l'Architecture que de savoir la force qu'on doit donner aux murs et aux piédroits qui soutiennent des voûtes et des arcs, pour résister à l'effort que font les voussoirs qui la forment pour les écarter".

Parmi ses ouvrages, c'est dans "La Science des Ingénieurs" paru en 1729 que Bernard de BELIDOR (1697-1761) est le plus explicite sur les idées du moment relatives aux voûtes.

A partir d'ici, on pourrait citer presque tous ceux qui ont contribué au développement de la Résistance des Matériaux et de la Stabilité des

Constructions, mais nous nous limiterons aux auteurs dont l'apport est très directement lié à la compréhension mécanique du gothique.

Bien qu'il ne traite pas directement de l'arc ogival, COULOMB (1736-1806) mérite plus que d'être simplement cité pour son mémoire de 1773 "Essai sur une application des règles de Maximis et Minimis à quelques Problèmes de Statique, relatifs à l'Architecture".

En effet, ce travail présente déjà ce qui va devenir dans la seconde moitié du 20^e siècle le calcul en plasticité et la Théorie de l'Analyse Limite des constructions, et l'on peut aussi déjà y comprendre pourquoi il est assez illusoire de chercher la solution exacte de la ligne de poussée d'un arc, tant elle est sensible aux variations des conditions aux limites. Le travail de Coulomb est une avancée remarquable en mécanique des constructions; masquée par les développements que prend au début du 19^e siècle la Théorie de l'Elasticité, qui est une tout autre philosophie d'approche, elle va rester oubliée pendant presque deux siècles, jusqu'à ce que les travaux d'un spécialiste de tout premier plan de l'analyse limite, le professeur Jacques HEYMAN de Cambridge, viennent la remettre à l'honneur en montrant que cette approche peut aussi s'appliquer aux maçonneries, sujet sur lequel nous reviendrons. On doit d'ailleurs à Heyman une analyse fouillée du mémoire de Coulomb.

Le peu de succès apparent du travail de Coulomb à son époque résulte peut-être de ce que, en avance sur son temps, il situe l'infinité possible de poussées au vide d'une voûte entre deux limites, une borne supérieure et une borne inférieure, alors que les bâtisseurs du moment attendent une recette de calcul à appliquer sans se poser de question.

Avant de passer à l'évolution des concepts au 19^e siècle, il est utile d'évoquer la question de la Connaissance des Matériaux qui va débiter ses premiers développements scientifiques au 18^e siècle.

Seront envisagées des propriétés mécaniques - résistance, déformabilité - et des propriétés de durabilité - une roche est-elle gélive par exemple - en ce qui concerne les matériaux pierreux de construction et les bois de charpente.

En dehors d'une question d'encrassement dû aux suies et aux fumées, le comportement de la pierre vis-à-vis de la pollution atmosphérique n'est pas trop à craindre avant le 19e siècle, quand l'industrialisation va brusquement la rendre catastrophique.

Le comportement au cours du temps reste du domaine de l'information acquise à long terme par l'observation, ce qui était à la portée des bâtisseurs médiévaux, et d'ailleurs, les techniques de laboratoire qui permettent aujourd'hui d'obtenir des données de manière accélérée laissent encore bien à désirer dans leur manière de reproduire les effets constatés à long terme in situ.

Il en va autrement de la résistance mécanique des matériaux utilisés, que l'on n'était pas en mesure de chiffrer au Moyen-Age.

Si quelques savants avaient déjà tenté l'une ou l'autre expérience élémentaire pour vérifier des théories, c'est le hollandais Piet van MUSSCHENBROEK (1692-1761), professeur à Utrecht puis à Leide, qui construit les premières machines d'essais des matériaux dignes de ce nom, et qu'il décrit dans son ouvrage "Physicae experimentales et geometricae" de 1729.

Toutefois, les machines conçues par van Musschenbroek restent de faible puissance, limitant les essais à des échantillons de petite taille qui ne sont pas nécessairement représentatifs des pièces volumineuses dont ils ont été extraits. Cette critique est déjà exprimée par le naturaliste BUFFON (1707-1788) qui étudie largement les propriétés mécaniques du bois dont il constate les importantes variations de résistance mécanique en fonction de la localisation de l'éprouvette prélevée dans le tronc, depuis le cœur jusqu'à l'aubier au sein d'une même section, et de bas

en haut de l'arbre (Histoire Naturelle, Vol. 2, 1775).

Buffon en déduit que les résultats obtenus par van Musschenbroek sur petits échantillons ne donnent pas l'information nécessaire à l'ingénieur, et que des essais sur poutres en vraie grandeur sont nécessaires.

En ce qui concerne la mesure de la résistance à l'écrasement des matériaux pierreux, il faut attendre les travaux de E. M. GAUTHEY (1732-1807) qui conçoit et construit la première presse, dans le cadre des débats qui partagent les spécialistes à propos du dimensionnement des piliers de l'église Sainte-Geneviève, futur Panthéon, à Paris. Cette machine, sera perfectionnée en 1802 par Jean RONDELET (1734-1829).

Nous sommes donc déjà bien loin du Moyen-Age où les informations sur la résistance mécanique des matériaux mis en œuvre faisaient défaut. Cette méconnaissance se marque d'ailleurs dans certains édifices par la superposition, dans un même pilier, d'assises de bonne pierre et d'autres d'un tuffeau dont la piètre qualité limite la résistance de l'ensemble.

Si cette lacune de connaissance a été le plus souvent sans conséquence, c'est par ce que, comme on peut le chiffrer aujourd'hui, le niveau de contrainte, aux endroits les plus sollicités des éléments porteurs d'une structure gothique correctement réalisée, atteint rarement plus que le dixième de la valeur d'écrasement: dès lors, une appréciation vraiment très approximative de la résistance de la pierre était plus que suffisante, et notre expérience de restauration nous a d'ailleurs montré que des pierres ne cèdent par écrasement que dans des circonstances manifestement pathologiques.

4.4. L'apport et les lacunes du 19^e siècle

Il est temps maintenant de revenir à l'évolution de la compréhension de cette pensée technique du bâtisseur médiéval à l'aube du 19^e siècle.

Nous ne reviendrons pas ici sur tout le développement de la Mécanique des Milieux continus qui va prendre un essor considérable et se baser sur la Théorie de l'Elasticité linéaire, alors que les maçonneries sont loin d'être élastiques, et que leur comportement est tout sauf linéaire, quoique, jusqu'à aujourd'hui, de pareilles approches sur lesquelles nous reviendrons restent bien utiles.

Nous risquerions en effet de développer toute l'histoire de la Mécanique des Matériaux au cours du 19^e siècle, qui est bien documentée par ailleurs, et qui n'est pas directement liée à la compréhension du gothique, car les architectes qui s'investissent alors dans ce gothique, tant en restauration de l'ancien qu'en création néo-gothique, dans la mouvance du courant romantique de l'époque, travaillent le plus souvent sans le concours des ingénieurs qui sont, eux, fort absorbés dans le cadre de la révolution industrielle.

Une exception est à faire concernant un travail paru en 1840 dans les Annales des Ponts et Chaussées à Paris: c'est le "Mémoire sur l'équilibre des voûtes en berceau" de l'ingénieur E. MERY dont l'incidence sera durable, puisque la procédure de construction de la ligne de poussée d'une voûte qui y est proposée, et qui convient d'ailleurs pour un arc gothique, est restée en usage jusqu'à aujourd'hui sous l'appellation d' "épure de Méry".

Le 19^e siècle compte une figure marquante qui sort vraiment de l'ordinaire, c'est Eugène VIOLLET-LE-DUC (1814-1879), architecte collaborateur de MERIMEE à la Commission des Monuments historiques, qui va consacrer toute son existence à l'étude et à la restauration des grands édifices gothiques.

Si l'œuvre de Viollet-le-Duc souffre aujourd'hui de multiples critiques, la vision de la manière d'aborder la sauvegarde du patrimoine ayant évolué, il faut reconnaître que, sans lui, bien des

témoins de notre passé qui tombaient en ruines auraient maintenant totalement disparu.

Les dix volumes de son "Dictionnaire raisonné de l'architecture française du 11^e au 16^e siècle" (1854-1868) restent aujourd'hui un monument, une source inépuisable de connaissance, même si l'ouvrage comporte des erreurs et des lacunes de compréhension concernant le rôle constructif de certains éléments de l'édifice, de même que des fautes de Résistance des Matériaux que Viollet-le-Duc aurait sans doute pu éviter s'il avait disposé de la collaboration des grands ingénieurs de son temps.

C'est dans le texte, et non via des commentaires à son sujet, qu'il faut lire Viollet-le-Duc pour l'apprécier.

Un reproche certes fondé est qu'à n'importe quel prix, il a cherché partout un point de vue rationnel dans la pensée technique médiévale. Dans sa thèse publiée en 1934, évoquée plus loin, "Eugène Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval", Pol ABRAHAM va rédiger d'une manière implacable le réquisitoire le plus sévère qui soit à propos de Viollet-le-Duc, dont il qualifie cependant le Dictionnaire de "*livre source le plus vaste, le plus pénétrant, le plus convaincant qui fut et sera sans doute jamais écrit sur l'architecture du Moyen-Age*".

Le temps passe, et la fin du 19^e siècle s'écoule sans nouveautés marquantes concernant la compréhension des édifices gothiques.

Un élément cependant aurait pu apparaître, et dont l'importance ne sera signalée qu'un bon demi-siècle plus tard par les travaux de R. MARK, évoqués plus loin, c'est l'action du vent sur ces grands édifices gothiques qui lui offrent une prise d'autant plus énorme qu'ils étaient, à l'époque, tout à fait isolés au milieu d'un ensemble de maisons basses.

Le 19^e siècle commence à prendre conscience de l'effet du vent sur les constructions, que l'on évoque dans l'expertise de l'accident du pont

d'Angers (1852) qui provoque la mort de plus de 200 soldats qui avaient cependant rompu le pas lors de leur passage. C'est l'accident du pont sur le Tai (1879), en Ecosse, avec la chute d'un train de passagers par une nuit de tempête, qui incite aux premiers calculs de la résistance au vent d'un ouvrage, qui sera d'ailleurs largement surdimensionné: c'est le pont sur le Forth, en Ecosse aussi et qui sera achevé en 1888.

Gustave EIFFEL, qui est dans le domaine de la construction plus un entrepreneur qu'un calculateur de structures, se passionne pour l'aérodynamique, et ses travaux scientifiques porteront, quant à eux, sur ce sujet, principalement dans les premières années du 20^e siècle lors des débuts de l'aéronautique. Et c'est ainsi que la Tour Eiffel, construite pour l'exposition universelle à Paris en 1889, doit, en dehors d'une opération immobilière particulièrement rentable, servir cette passion d'Eiffel pour l'aérodynamique et être un laboratoire de mesure en vraie grandeur de l'effet du vent. Calculée pour une pression forfaitaire de 300kg/m^2 , elle ne risque rien.

Les premiers ouvrages à bénéficier du contrôle de l'action du vent sont des constructions d'ingénieur, et l'architecture au sens large n'en bénéficie pas.

Eugène Viollet-le-Duc ne parle pas de l'action du vent et ignore en la matière le rôle joué par l'arc-boutant de la volée supérieure, qui sert précisément à transmettre au contrefort la résultante des pressions et dépressions subies par la toiture.

Dans son célèbre traité d'architecture (1899-1901) avec quelque 200 pages consacrées au gothique, Auguste CHOISY ne fait pas non plus allusion à l'effet du vent sur ces toitures élevées.

Et récemment, lors de l'examen des dégâts causés par la tornade qui a frappé Tournai et sa cathédrale le 14 août 1999, nous avons trouvé abattus des pinacles néogothiques dessinés et construits par l'architecte Bruno RENARD au milieu du 19^e siècle, et qui étaient dépourvus d'un tenon métallique, élémentaire sécurité contre le glissement et

la bascule. Il ne s'agissait pas d'un oubli de pose, car les logements dans les deux pierres adjacentes n'avaient pas été creusés: l'architecte ne pensait donc pas à l'effet du vent.

Comment, dès lors, reprocher aux bâtisseurs médiévaux de n'avoir pas pris en compte pareille sollicitation à laquelle il est fait appel aujourd'hui, par exemple, pour une explication de l'accident célèbre de l'effondrement du chœur de la cathédrale de Beauvais en 1284?

Et il ne sera pas question avant longtemps de la prise en compte du vent.

Pour sa modélisation des structures gothiques, Robert MARK va utiliser les normes existantes d'action du vent sur les constructions, ce qui donne surtout des ordres de grandeur généralement bons des efforts mis en jeu, mais sans garantie de fiabilité et cela d'autant moins que l'édifice s'écarte de la géométrie simple de buildings modernes et d'immeubles tours. Nous en avons eu la preuve vingt ans plus tard, lors de notre étude relative à la grande tour de l'hôtel de ville de Bruxelles, complètement ajourée depuis le niveau de 40 m jusqu'à son sommet à près de 100 m.

Il est donc des cas où l'analyse sur modèle en tunnel aérodynamique s'impose; toutefois, tant la construction et l'instrumentation du modèle que le relevé et l'interprétation des multiples mesures prises en soufflerie représentent un budget considérable qui réserve ce type d'opération à des édifices exceptionnels, la cathédrale de Beauvais, la grande tour de l'hôtel de ville de Bruxelles, qui le justifient car les normes actuelles s'appliquent très mal à leurs dentelles de pierre. Mais nous sommes déjà ici à la fin du 20^e siècle.

4.5. De nouvelles idées au 20e siècle

Dans les années qui suivent la première guerre mondiale, vont apparaître quelques travaux plus critiques concernant directement les édifices gothiques, dans lesquels, entre autres, l'observation des dégâts causés par les bombardements de 1914-1918 va susciter des réflexions nouvelles.

On sait depuis longtemps que le système d'arcs du gothique, ogives, doubleaux et formerets, constitue une ossature stable en soi et potentiellement porteuse des voûtes.

Vers 1960, le professeur André PADUART présentait encore, dans l'introduction à son cours de

voiles minces en béton, à l'Université Libre de Bruxelles, la voûte gothique comme une ossature porteuse avec éléments de remplissage, ce qui était l'idée développée par Viollet-le-Duc un siècle plus tôt, et qui semblait évidente au premier coup d'œil.

Un témoin marquant de la visualisation de ce squelette de pierre se trouve dans les vestiges de l'abbatiale d'Ourscamp, près de Compiègne, mise en vente à la Révolution française, et dont le démolisseur, marchand de matériaux, a déposé les voûtes en laissant en place les piliers et les arcs qui subsistent seuls depuis deux siècles (fig. 9).



Fig. 9 : Les arcs de l'abbatiale d'Ourscamp ont subsisté après la démolition qui a suivi la Révolution française.

A l'opposé, et ceci est plus surprenant de prime abord, des édifices situés dans la zone du front de la Grande Guerre ont vu des voûtains tenir en place, alors que les arcs supposés porteurs avaient été détruits par des tirs d'artillerie, ce qui mettait bien sûr en doute leur rôle réellement porteur.

Dans deux articles, parus en 1928 et 1934, V. SABOURET, ingénieur des Ponts et Chaussées, montre que la nature des arcs de la voûte gothique est décorative et non porteuse. Leur rôle structural serait ainsi limité, comme le suppose J. FITCHEN, à la seule phase de chantier pendant laquelle ils servent de support aux coffrages pour la construction des voûtains.

SABOURET fait ainsi apparaître, notion fondamentale pour le restaurateur d'aujourd'hui, qu'il est logique que la voûte se déconnecte des arcs formerets: c'est ce qu'on appelle depuis lors "les fissures de Sabouret".

Cette constatation, qui pourrait paraître accessoire, est au contraire primordiale, car c'est la mise en évidence du fait que l'état normal d'une voûte est d'être fissurée, et qu'une fissuration qui ne s'avère pas évolutive ne doit pas d'office être considérée comme pathologique.

A la même époque, dans son mémoire déjà cité de 1934, "Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval", l'architecte Pol ABRAHAM développe aussi une étude qui fait progresser les connaissances; pour l'explication du fonctionnement d'une voûte gothique, il adopte toutefois une "analogie" qui est mal conçue, par ignorance sans doute du concept même d'analogie", et qui conduit à une solution erronée.

Une "analogie" résulte de la constatation que deux phénomènes physiques, totalement étrangers l'un à l'autre, sont régis par des formulations mathématiques similaires, par exemple des équations différentielles de même forme qui s'avèrent difficiles à résoudre: si la solution a été trouvée pour l'un des problèmes, par voie expérimentale éventuellement, les résultats ainsi disponibles sont dès lors directement transposables sans calculs à l'autre problème.

En Résistance des Matériaux, des exemples d'analogie sont ceux de la méthode dite des poids élastiques ou de Mohr, dans laquelle un diagramme fictif de moments fléchissants donne la déformée d'une poutre, et pour les problèmes de torsion, l'analogie bien connue de la membrane due à PRANDL, l'analogie rhéoélectrique et l'analogie hydrodynamique.

Pour trouver le cheminement des efforts dans une voûte gothique, Abraham imagine que le flux de contraintes suit le trajet d'une bille lâchée au point haut de l'extrados de la voûte, et qui roule sur cette surface, entraînée par la pesanteur: elle suit d'abord la ligne de plus grande pente pour rejoindre le creux du dièdre formé par l'arc diagonal et les parois des voûtains qui s'y raccordent; elle chemine ensuite le long de ce caniveau suivant l'arc diagonal pour rejoindre le sommet du pilier qui supporte la voûte.

Ceci n'est évidemment pas une analogie au sens mathématique du terme, car les équations qui régissent les deux phénomènes sont tout à fait différentes: le cheminement supposé des efforts qui convergent vers l'arc diagonal pour suivre ensuite celui-ci jusqu'au support n'est pas correct. Robert MARK montrera un demi-siècle plus tard que les trajectoires de contraintes principales convergent en fait directement à travers les voûtains vers les supports des coins de la voûte, sans passer par les nervures qui n'ont donc effectivement pas le rôle initialement supposé d'ossature.

Après les travaux de Sabouret et d'Abraham, la compréhension du gothique marque un temps d'arrêt jusqu'à la fin des années soixante du 20^e siècle.

Au début de la seconde moitié de ce siècle se développe, pour les ossatures métalliques, le calcul en plasticité qui s'étend bientôt au béton armé; par la Théorie de l'Analyse Limite, on peut cerner la charge ultime d'effondrement de la construction grâce à deux théorèmes qui en donnent l'un, une borne supérieure et l'autre, une borne inférieure.

Cette approche est très en vogue au début des

années soixante, et ma propre thèse de doctorat y est d'ailleurs consacrée.

Jacques HEYMAN, professeur à Cambridge, est un spécialiste renommé de l'analyse limite, et dans un article fondamental paru en 1966, intitulé "The Stone Skeleton", il montre que cette approche peut aussi s'appliquer aux ouvrages en maçonnerie, ce qui avait de quoi surprendre, puisque l'analyse limite était basée sur la formation de rotules plastiques rendues possibles par la ductilité du métal, dont le comportement "fragile", c'est-à-dire cassant, des matériaux pierreux est bien éloigné. Heyman retrouve ainsi certaines idées déjà exprimées dans le mémoire de Coulomb en 1773. Le même auteur publiera en 1995, sous le même titre "The Stone Skeleton", un livre de synthèse qui reprend une majorité de ses travaux sur le sujet.

On retrouve ainsi l'idée qu'une voûte peut représenter une infinité de lignes de poussée possibles parmi lesquelles se trouve la solution de l'Elasticité, qu'il apparaît illusoire de vouloir cerner de trop près, tant elle est sensible aux modifications des conditions aux limites comme un mouvement des appuis.

Ainsi, les travaux de Jacques Heyman constituent un apport substantiel à la compréhension des structures gothiques.

Il y a une quarantaine d'années, la capacité des ordinateurs est encore insuffisante pour permettre l'usage de logiciels de calcul de structures par une approche du type de la méthode des éléments finis qui remplace l'objet réel par un modèle numérique constitué d'un assemblage d'un très grand nombre de petits blocs connectés par des noeuds, et dont l'étude peut requérir la résolution d'un système comportant plusieurs centaines de milliers d'équations. Pour des constructions qui ne peuvent se réduire à un ensemble de pièces de forme géométrique simple auxquelles peut s'appliquer une solution approchée de Résistance des Matériaux, la seule issue est alors à cette époque de recourir à une approche expérimentale, par des essais sur modèles en laboratoire par exemple, en attendant le progrès

de l'outil informatique qui arrivera vite.

Connue dans son principe depuis longtemps, rendue possible pratiquement par l'apparition des premières résines synthétiques et encore largement utilisée il y a 40 ans, la photoélasticité est une technique de laboratoire qui exploite la relation entre l'état de contrainte et la modification du comportement optique, la biréfringence accidentelle, de certaines résines transparentes (araldite, polyméthylméthacrylate,...).

Dans un modèle observé en lumière polarisée, les contraintes se manifestent sous forme de franges colorées que l'on peut interpréter pour en déduire, par des lois de similitude, celles qui se produiront dans la structure réelle.

C'est la méthode que nous utilisons à l'Université Libre de Bruxelles dans les années soixante pour étudier des problèmes particuliers de grands édifices de prestige projetés chez nous.

A la même époque aux Etats-Unis, Robert MARK, professeur à Princeton, étudie aussi des constructions d'architecture moderne par la même technique. Il va avoir l'idée d'appliquer cette approche de laboratoire aux grands édifices gothiques. A côté de publications multiples, son ouvrage "Experiments in gothic structures" paru en 1982 va avoir un retentissement remarquable.

Il faut dire que les images superbes des franges colorées des modèles photoélastiques, qu'il s'agisse de structures gothiques ou de grands édifices modernes construits à Bruxelles, accrochent le regard le moins expert, comme j'ai pu moi-même le constater dans mon expérience d'enseignant et de conférencier, et qu'elles donnent l'impression de pouvoir enfin comprendre des phénomènes particulièrement complexes.

R. MARK va ainsi analyser, avec des modèles à deux dimensions d'abord, qui constituent une première approximation, des édifices marquants, comme les cathédrales de Bourges, Chartres, Palma de Majorque, Beauvais, Notre-Dame de Paris,...



Fig 10 : Étude de voûtement de la cathédrale de Bourges par modèle photoélastique (d'après R. Mark).

La crédibilité des résultats est confortée par la conformité des prédictions du laboratoire aux désordres constatés sur place. (fig. 10).

Ainsi, R. MARK va-t-il proposer une nouvelle analyse de l'effondrement du chœur de Beauvais, - ce ne sera pas la dernière-, justifier la construction des arcs-boutants supérieurs de Chartres, montrer que le passage de la voûte sexpartite à la voûte quadripartite au tournant des années 1200 n'est pas l'effet d'une mode imaginée par les historiens de l'art mais une nécessité technique.

Il franchit le pas vers l'analyse par modèles photoélastiques tridimensionnels dont nous savons par expérience que l'étude est lourde et délicate, pour montrer que, dans une voûte sur croisée d'ogives, les trajec-

toires de contraintes principales convergent directement à travers les voûtains vers les supports, sans passer par les arcs diagonaux: il confirme ainsi de manière scientifique des idées déjà exprimées mais non ou erronément démontrées par Sabouret et Abraham: dans la voûte gothique, les arcs renforcés de pierre ont une vocation esthétique, peut-être constructive au moment du chantier pour soutenir le coffrage des voûtains, mais certainement pas structurelle.

Ainsi, l'idée du squelette de pierre comme ossature porteuse, qui semble l'essence même de la voûte gothique, est bien à rejeter.

C'est un point de vue admis depuis si longtemps qui se trouve ébranlé, et au-delà d'une question

d'histoire des techniques, les conclusions à en tirer sont vraiment importantes pour l'ingénieur responsable d'un édifice à restaurer.

On remarquera toutefois que les études photoélastiques emploient des modèles en résines de comportement élastique linéaire, et supposent donc aussi des structures réelles élastiques linéaires et résistantes en traction, ce qui n'est bien sûr pas le cas.

En quelque sorte, la confirmation de la validité des résultats ne peut venir qu'à posteriori, quand les zones de traction qui fissureraient le matériau sont inexistantes ou suffisamment restreintes. Ce sera souvent le cas, puisque les édifices étudiés sont ceux qui subsistent, et qui étaient dès lors effectivement conçus avec peu ou pas de contraintes de traction qui auraient pu les mettre en péril.

Des confirmations de la validité de la modélisation apparaissent dans le cas d'édifices tels que les cathédrales de Chartres et Bourges où l'examen in situ montre que des pierres ont dû être remplacées aux endroits où le modèle de laboratoire prédisait justement des tractions susceptibles de détériorer les joints de mortier.

Bien sûr, le souhait de pouvoir prendre en compte dans les modèles de laboratoire le comportement non linéaire dû à l'absence ou à la faible valeur de la résistance en traction des joints de mortier a fait l'objet d'attention et continue de le faire avec les modèles numériques d'aujourd'hui.

A ce propos, les tentatives que nous avons nous-mêmes menées à l'Université Libre de Bruxelles, pour réaliser des modèles photoélastiques fissurants en laboratoire, soit par sciage progressif provoquant de manière itérative la progression des fissures, soit par emploi de résines sous-polymérisées qui résistent mal en traction, se sont avérées positives mais limitées à des modèles relativement simples, et donc impraticables pour représenter la situation d'un édifice gothique.

A partir des années 80 du 20^e siècle, toutes les approches un tant soit peu sophistiquées dans le domaine qui nous concerne sont basées sur une modélisation numérique, de type éléments finis,

avec tous les risques que présente l'usage de logiciels commerciaux entre des mains non expertes, car tous les résultats doivent être considérés avec circonspection, et il est beaucoup trop tentant de faire d'office confiance à l'ordinateur, sans compter que le résultat obtenu est souvent sensible à la manière de discrétiser la structure, c'est-à-dire de la diviser en éléments pour constituer le modèle numérique.

Au départ, les premiers logiciels d'éléments finis sont conçus par et pour des utilisateurs dans les domaines de l'aéronautique, du nucléaire, de l'industrie automobile, ... qui se satisfont parfaitement, dans les débuts, de la loi d'élasticité linéaire pour représenter le comportement des matériaux qu'ils utilisent.

Dans les premières applications qui seront faites à des édifices gothiques, et R. MARK lui-même en est l'un des précurseurs, on utilise les logiciels disponibles, avec ce que cela comporte comme insuffisances, qui sont en fait identiques à celles que nous avons déjà identifiées pour les modèles photoélastiques de laboratoire, puisqu'elles portent sur le même non-respect du comportement réel, non linéaire et fissurant en traction des maçonneries, et que le résultat ne peut être validé qu'à posteriori et à la condition que les zones de traction soient absentes ou d'étendue très restreinte.

Mais la facilité d'emploi de l'approche numérique est évidente: très vite au cours des années, le coût des calculs s'abaisse avec l'accroissement de puissance des ordinateurs, et l'étude de l'incidence d'un paramètre ou d'une situation différente, présence ou absence d'un renforcement local, d'un arc-boutant supérieur ou d'un pinacle, par exemple, ne requiert que l'introduction de quelques instructions ou la modification de quelques données, par rapport à l'usinage long et coûteux d'un nouveau modèle de laboratoire qu'il fallait préparer manuellement, puisqu'il s'agit de pièces uniques. En outre, l'approche tridimensionnelle restée rare sur modèle de laboratoire, tant elle est ardue, peut ici se développer sans entrave.

Il n'empêche que la procédure reste délicate, car des représentations graphiques comme l'image de

la structure déformée par les sollicitations, dont le logiciel donne un dessin où les déplacements sont artificiellement très amplifiés pour en faciliter la lecture, donne vite l'impression que tout un chacun peut comprendre d'emblée ce qui se passe, alors que l'interprétation requiert souvent une longue expérience patiemment acquise. Disons clairement que cette approche informatique, entre des mains inexpérimentées, est un outil dangereux.

Pourquoi dangereux? Pour le risque de mal comprendre une réalisation médiévale? Il y a plus, et le panorama que nous allons dresser ci-après de ce qui se passe dans le dernier quart du 20e siècle montre que bien des études n'ont plus pour finalité de comprendre, de connaître, mais d'exécuter une restauration commandée dans les limites d'un budget, de durée et d'exigence de rentabilité d'un chantier qu'impose un cahier des charges, conditions qui incitent à l'interprétation hâtive d'une analyse numérique, parfois réalisée plus pour obtenir de belles images à exposer que pour l'information réellement attendue.

Comme nous l'avons vu, les logiciels classiques d'éléments finis se contentent d'une loi d'élasticité linéaire pour le matériau mis en oeuvre. Pourquoi ne pas chercher à modéliser le comportement fissurant sous traction qui caractérise les maçonneries? C'est ce qui a été fait pour l'étude de la grande tour de l'hôtel de ville de Bruxelles, pour laquelle un processus itératif a été mis en place: lors d'un premier passage, qui est le calcul élastique linéaire, le programme détecte les zones où il y a traction et va les fissurer; un deuxième calcul élastique du modèle ainsi fissuré fait apparaître une extension des zones de traction, qui sont à leur tour fissurées, et ainsi de suite jusqu'à ce que, au bout de cinq itérations par exemple, on constate que les zones tendues sont stabilisées et ne progressent plus. On a ainsi réalisé numériquement la fissuration du modèle suivant une progression identique à celle de la fissuration physique qui s'établirait de proche en proche.

Si la procédure qui vient immédiatement à l'esprit pour "fissurer" un modèle numérique est de déconnecter les noeuds dans les zones de traction pour fabriquer réellement les fissures, cette procé-

ture est lourde numériquement puisqu'elle change le modèle et oblige à recalculer sa matrice: nous avons dès lors préféré rendre inefficaces les zones tendues en les affectant d'un module d'élasticité presque nul.

La procédure reste lourde et d'un coût rarement abordable: ainsi pour le cas envisagé de la grande tour de l'hôtel de ville de Bruxelles, un cas de charge avec cinq itérations demandait, en 1993, une semaine d'occupation, jour et nuit, du seul super-ordinateur disponible en Belgique. Et encore la modélisation reste-t-elle imparfaite car elle ne tient pas compte de ce qui a pu se produire au cours des phases successives du chantier.

Il faudra donc attendre encore quelques années pour que les progrès du matériel informatique rendent praticables de telles procédures à des coûts abordables, mais l'évolution est rapide.

En attendant, la modélisation numérique en situation élastique linéaire peut continuer à rendre d'appréciables services, et dans les cas où il faut résoudre rapidement un problème pratique, une formule intermédiaire consiste à introduire dès le départ dans le modèle les fissures principales qui ont été observées dans l'édifice: c'est une option pratique permettant d'intégrer leur présence dans les prévisions d'efficacité des interventions envisagées, un calcul d'opportunité qui ne pourra évidemment pas expliquer pourquoi les fissures considérées se sont produites.

C'est cette option que nous avons choisie fin 2001 pour l'étude des mesures de sauvegarde de la Tour Brunin dans le transept de la cathédrale de Tournai.

Notre propos semble ainsi progressivement dévier de la recherche fondamentale ayant pour but de comprendre une pensée technique, vers la recherche appliquée destinée à soutenir des décisions urgentes attendues de l'ingénieur dans le cadre concret de restaurations qui peuvent tenir du sauvetage.

Un panorama de la situation de ces vingt dernières années s'impose donc avant de terminer par les perspectives d'avenir.

4.6. La fin du 20^e siècle

Nous en arrivons au dernier quart du 20^e siècle dont une vision d'ensemble est certes difficile par manque de recul en la matière.

Une évolution manifeste des pensées s'est produite en raison de l'attitude nouvelle du public vis-à-vis de la conservation du patrimoine, comme en témoigne le succès remporté par les Journées du Patrimoine.

La Charte de Venise, rédigée en 1964 lors du 2^e congrès international des architectes et techniciens des monuments historiques, et la création en 1965 de l'ICOMOS, (International Council on Monuments and Sites) organe conseiller de l'UNESCO, vont provoquer l'officialisation d'une dynamique nouvelle dans la conservation du patrimoine, dans lequel s'inscrivent bien sûr nos édifices gothiques, et souligner l'importance d'une étude préalable à toute intervention.

Cette fois, les ingénieurs sont explicitement impliqués au même titre que les autres intervenants dans la conservation, et vont se trouver regroupés dans le cadre de congrès qui leur sont propres, ainsi qu'au sein de comités scientifiques dévolus aux structures historiques par d'importantes sociétés telles que l'IABSE (International Society of Bridges and Structural Engineering), l'IASS (International Society for Shell and Spatial Structures) et le Comité Scientifique International des Structures (ISCARSAH) de l'ICOMOS.

Un créneau nouveau d'activité de l'ingénieur s'est manifestement ouvert depuis 20 ans.

Et les congrès, colloques et séminaires spécialisés se multiplient, hélas avec des chevauchements sans concertation des centres d'intérêt, ce qui suscite un problème nouveau, celui de la surcharge et il n'est plus possible à tout un chacun de participer à toutes les manifestations qui l'intéressent.

Si des études permettent de mieux comprendre les intentions des bâtisseurs médiévaux, les questions de conservation et de restauration, qui relèvent davantage des sciences appliquées, passent souvent au premier plan, et la recherche fondamentale en la matière reste à poursuivre.

Dans la diffusion des connaissances acquises concernant le domaine examiné ici, la situation est

aujourd'hui confuse.

Bien des observations intéressantes – nous avons pu le constater – restent non publiées et seront donc perdues parce que l'ingénieur trop occupé considère sa mission terminée dès l'achèvement du chantier de restauration.

Dans le même temps, de trop nombreux articles paraissent çà et là avec de multiples redites, rassemblés dans des actes de congrès, pour autant que ces actes soient effectivement publiés, alors qu'il arrive qu'ils restent à l'état d'intention dans le chef des organisateurs ou que leur édition soit à diffusion purement locale, inaccessible, voire ignorée de ceux qui oeuvrent dans le même domaine.

La limite est difficile à établir entre ce qui est compréhension des considérations techniques du bâtisseur médiéval, et relève de l'histoire des sciences et des techniques, et ce qui est projet et procédés de conservation ou de restauration, la première étant souvent une condition du choix opportun des seconds.

Nombre de textes publiés sur le sujet qui nous concerne ici sont dès lors égarés dans des revues techniques d'ingénieurs, certes souvent de niveau international, mais où l'on ne pense pas systématiquement à aller chercher ce genre d'information.

Faut-il s'étonner d'une pareille situation? Je ne le pense pas, et je crois qu'il faut au contraire s'en réjouir comme témoignage d'un intérêt pas seulement accru mais nouveau pour la question. En effet cette situation désordonnée n'a sans doute rien d'exceptionnel et se retrouve aujourd'hui dans les domaines de la recherche qui font appel à une collaboration interdisciplinaire. Ainsi, l'explosion brutale, il y a trente ans, de l'intérêt pour la biomécanique, discipline qui applique à l'être vivant les modes de pensée et les techniques de l'ingénieur, a-t-elle aussi conduit à un foisonnement anarchique de l'information qui intéressait aussi bien le médecin que l'ingénieur.

Ainsi arrive le moment de réaliser des regroupements critiques d'informations et des travaux de synthèse, dont la récente thèse de doctorat de P. SMARS (2000) est un bon exemple.

5. CONCLUSION

Quel est l'état actuel de nos connaissances, et que faut-il encore comprendre du point de vue de la pensée technique dans ces merveilleux édifices du gothique?

Nous croyons en avoir saisi les principes généraux, et nous savons aujourd'hui qu'il s'agit d'un système constructif remarquable qui s'adapte, par son mortier longtemps plastique et sa structure déformable, tant à des erreurs constructives mineures qu'à certains mouvements de terrain, et qui est une bonne réponse aux besoins économiques et sociaux de son époque.

La recherche n'est pas pour autant terminée, et les nombreuses hésitations dont la compréhension de ces édifices a témoigné au cours de l'histoire, de même que le caractère bien imparfait et largement insuffisant de nos modélisations numériques, nous incitent à beaucoup de modestie. Il serait présomptueux de penser que dans une question qui s'avère aussi complexe, tant du point de vue de la technique que de celui de l'histoire, dont bien des archives restent encore à explorer scientifiquement, ce que nous croyons établi aujourd'hui ne sera pas remis en cause demain.

Un exemple frappant en est la multiplication, depuis quelques années, des idées successives émises pour tenter d'expliquer le célèbre effondrement du chœur de la cathédrale de Beauvais en 1284.

Comme dans un doctorat où les thèses annexes sont des propositions de recherche pour l'avenir, nous suggérons ici l'une ou l'autre piste à suivre.

Le domaine de la modélisation numérique est certes largement ouvert, et il devrait être prometteur, avec sans doute des tâtonnements inévitables, dont certains sont dus à l'inexpérience de chantier du numéricien.

Une autre piste de recherche, qui devrait motiver plus en commun les historiens de l'art et les ingénieurs, est celle de la présence du métal dans les constructions gothiques.

Laissant bien sûr de côté les renforcements métalliques qui y ont été introduits au cours des siècles à titre de véritables prothèses, nous songeons au

métal d'origine, comme celui qui est connu depuis longtemps à la Sainte-Chapelle à Paris.

Si des pièces métalliques à vocation structurale sont visibles et connues ici et là dans nos grands édifices gothiques, c'est surtout à l'occasion de déposes de pierres lors des restaurations récentes qu'on les découvre en quantités impressionnantes, noyées dans la maçonnerie.

Et c'est alors que nos analyses numériques d'aujourd'hui en constatent le bien-fondé, car leur présence, conçue intuitivement par les bâtisseurs médiévaux, était bien indispensable à la stabilité de l'édifice.

Songons par exemple aux tirants métalliques qui relient les contreforts de la cathédrale de Beauvais, et dont le rôle amortisseur qui réduit les fréquences propres d'oscillation de ces hautes lames de pierres vient d'être découvert; songeons aussi à la quantité de métal mis au jour dans la grande tour gothique de l'hôtel de ville de Bruxelles, avec la hampe de sa girouette qui descend à 8 m dans la maçonnerie, constituant une véritable pierre armée, ainsi qu'à ses arcs-boutants armés eux aussi, alors que la simulation numérique montre que le vent peut effectivement les mettre en traction.

Le métal dans l'architecture gothique, voici donc parmi tant d'autres, un thème de recherche pour les temps à venir et l'on pourrait avancer encore bien des propositions de questions qui restent à investiguer.

Loin d'être un sujet épuisé, la compréhension de la pensée technique des bâtisseurs médiévaux reste bien un thème d'étude largement ouvert pour le 21^e siècle.

Prof. dr. ir. Pierre Halleux

BIBLIOGRAPHIE

- ABRAHAM P., *Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval*. Vincent, Fréal et Cie, Paris, 1934.
- ADAM J.-P., *La construction romaine*, Picard, Paris, 1984.
- BARNES C. E., *Le "problème" Villard de Honnecourt*. in Les bâtisseurs de cathédrales gothiques. Musées de la Ville de Strasbourg 1989, pp. 209-223.
- BECHMANN R., *L'Architecture gothique: une expression des conditions du milieu*. Pour la Science, édition française de Scientific American, 1978, n°4, pp. 94-105.
- BECHMANN R., *Les racines des cathédrales*. Payot, Paris. 1984.
- BECHMANN R., *Villard de Honnecourt. La pensée technique au XIII e siècle et sa communication*. Picard, Paris, 1991.
- BECHMANN R., *Le génie des bâtisseurs*. Historia n°9801 "Le secret des cathédrales", 1998, pp. 35-38.
- BELIDOR B. F., *La science des Ingénieurs*. Paris. 1729.
- BOIRET Y., *La Cathédrale Saint-Pierre de Beauvais - Faiblesses structurelles*. In "Stable-Unstable?", Lemaire R. P. et Van Balen K. éd. Leuven University Press, 1988, pp. 299-311.
- CHOISY A., *Histoire de l'architecture*. Paris, 1899, tome premier et tome second, réédition. SERG. Ivry, France, 1976.
- CROCI G., *The conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*. Computational Mechanics Publications, Southampton, 1998.
- DAMISCH H., *Viollet-le-Duc. L'architecture raisonnée*. Collection Savoie, Paris, 1978.
- DELBECQ J.M., *Analyse de la stabilité des ponts en maçonnerie par la théorie du calcul à la rupture*. In "Restauration des Ouvrages et des Structures". Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1983, pp. 281-328.
- ERLANDE-BRANDENBURG A., PERNOUD R., GIMPEL J., BECHMANN R., *Carnets de Villard de Honnecourt*. Stock, Paris, 1986.
- ERLANDE-BRANDENBURG A., "Quand les cathédrales étaient peintes". Découverte Gallimard, Paris, 1993.
- ESPION B., ELINCK S., HALLEUX P., *Wind Induced Stresses in the Spire of Brussels Town Hall Tower*. IABSE Symp. Rome, 1993, pp. 449-456.
- FITCHEN J., *The Construction of Gothic Cathedrals. a study of Medieval Vault Erection*. University of Chicago Press. Chicago-London, 1961.
- FITCHEN J., *Building Construction Before Mechanization*. The MIT Press. Cambridge. Mass., 1986.
- GIMPEL J., *Les bâtisseurs de cathédrales*. Ed. du Seuil, Paris, 1980.
- GODART B., TIVERON M., DUVAL D., *Modélisation de la cathédrale de Strasbourg à l'aide du code de calcul aux éléments finis CESAR-LCPC*. Etude de l'influence de mouvements d'appuis sur le comportement d'une partie de l'édifice. Bull. Labo. Ponts et Chaussées, 206, nov-déc 1996, pp. 41-61.
- GODART B., *Influence of Foundation Settlement on the Behaviour of Strasbourg Cathedral, France*. *Structural Engineering Internat.* (Journal of IABSE) 11, 4, nov 2001, pp. 223-227.
- HALLEUX P., *La voûte gothique: une audace de bâtisseur?* Ann. Trav. Publ. Belg. 1989, 6, pp. 429-454.
- HALLEUX P., *Auscultation des édifices anciens: pourquoi? comment?* Europea, Bruxelles 1990, pp. 100-122.
- HALLEUX P., *Restauration des édifices anciens: de la théorie aux cas concrets*. Inst. Urb. ULB, Bruxelles 1990-16pp.
- HALLEUX P., *La tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles: philosophie d'une restauration*. CNRCC. Bruxelles 1993, 31 pp.
- HALLEUX P., *Restauration de la Grande tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles. Retombée des études scientifiques d'accompagnement*. in ARDIC, Rénovation urbaine et conservation du patrimoine. Bruxelles 1995, 11pp.
- HALLEUX P., *La déformabilité de la tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles sous les effets climatiques (vent et ensoleillement)*. 4th Nat. Cong. Theoretical and Applied Mechanics. Leuven 1997, pp. 489-492.
- HALLEUX P., *L'ingénieur dans la conservation du patrimoine*. Nouvelles A. Ir. Br. déc 1999, pp. 6-7.
- HALLEUX P., *The gothic tower of Brussels town hall: a scientific approach to the problems and choices concerning restoration*. in *Sustained care of the cultural heritage against pollution*, Council of Europe Publishing, Cultural Heritage n°40, Strasbourg 2000, pp. 63-94.
- HALLEUX P., *Le métal d'origine dans la grande tour gothique de l'hôtel de ville de Bruxelles*. Bull. ICOMOS Wallonie-Bruxelles, dossier 2001, pp. 2-9.

- HALLEUX P., *Le titane en grosses barres d'armature dans la tour de l'hôtel de ville de Bruxelles: une première mondiale en restauration*. Bull. ICOMOS Wallonie-Bruxelles, dossier 2001, pp. 10-12.
- HAMILTON S. B., *The Historical Development of Structural Theory*. Proc. ICE. I (III), 1952. pp. 374-402 - discussion pp. 402-418.
- HEYMAN J., *The Stone Skeleton*. Int. J. Solids Structures, 1966. Vol. 2, pp. 249-279.
- HEYMAN J., *On Shell Solutions for Masonry Domes*. Int. J. Solids Structures, 1967. Vol. 3, pp. 227-241.
- HEYMAN J., *Spires and Fan Vaults*. Int. J. Solids Structures. 1967, Vol. 3, pp. 243-257.
- HEYMAN J., *Coulomb's memoir on statics*. Cambridge University Press, 1972.
- HEYMAN J., *La restauration des ouvrages de maçonnerie: principes structurels*. In "Restauration des Ouvrages et des Structures" Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. 1983, pp. 329-334.
- HEYMAN J., *The crossing piers of the French Panthéon*. The Structural Engineer. 1985. Vol. 63A. n° 8, pp. 230-234.
- HEYMAN J., *Heningbrough Spire*. Proc. of the 2nd Int. Conf. Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings, ed. by C.A. Brebbia et al., Vol. 1, pp. 13-22, Computational Mechanics Publications, 1991.
- HEYMAN J., *The Stone Skeleton*. Cambridge University Press. 1995.
- HOFSTATTER H. H., *Gotbique*. Série Architecture universelle. Fribourg, 1964.
- ICHER F., *Les oeuvriers des cathédrales*. Ed. de la Martinière 1998.
- JOWAY H. F., *Le comportement structural d'édifices gothiques de la région mosane*. Thèse de doctorat ULg 1976.
- JOWAY H. F., *Etude de la structure d'édifices gothiques*. Annales de l'ITBTP, 1978. n°363, pp. 53-70.
- JOWAY H. F., *Les grands chantiers urbains et les constructions anciennes*. Ann. Trav. Publ. Belg., 1978. 4. pp. 328-340.
- KERISEL J., *Old structures in Relation to Soil Conditions*. 15th Rankine Lecture. Géotechnique, London, 1975, 25, n°3, pp. 433-483.
- KERISEL J., *Les chantiers et monuments du passé: leçons pour l'ingénieur et l'architecte*. Annales de l'ITBTP, 1982, n°10, pp. 37-80.
- KERISEL J., *Les restaurations à travers le temps. Un facteur important: le sol. Exemple d'une restauration célèbre: celle du Panthéon français*. In "Restauration des Ouvrages et des Structures" Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. 1983, pp. 9-24.
- KERISEL J., *Down the earth*. A.A. Balkema, Rotterdam, Boston, 1987.
- KIMPEL D., SUCKALE R., *L'architecture gothique en France, 1130-1270*, Flammarion, 1990 (traduction de l'édition originale, Hirmer Verlag, Munich, 1985).
- LASSUS J. B. A., *Album de Villard de Honnecourt*. Imprimerie Impériale, Paris 1858.
- MACAULAY D., "Naissance d'une cathédrale" Deux Coqs d'Or, Paris, 1981.
- MARK R., ABEL J. F., O'NEILL K., *Photoelastic and Finite-element Analysis of a Quadripartite Vault*. Experimental Mechanics. 1973. Vol. 13, n° 8. pp. 322-329 et Proc. SESA, Vol. 30. n° 2, 1973. pp. 322-329.
- MARK R., *Modeling Architectural Structure: Experimental Mechanics in Historiography and Criticism*, (the 1982 William M. Murray Lecture). Experimental Mechanics, 1982. Vol. 22. n°10. pp. 361-371.
- MARK R., *Experiments in gothic structures*. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, London, England, 1982.
- MARK R., CLARK W., *Le Gotbique: une architecture empirique*. Pour la Science, édition française de Scientific American. 1985, n°87, pp.72-79.
- MARK R., *Structural archeology: photoelastic and finite-element modeling of historic architecture*. In "Stable-Unstable?" Lemaire R. P. et Van Balen K., éd. Leuven University Press. 1988, pp. 79-91.
- MARK R., *Light, Wind and Structure*. MIT Press. 1990.
- MASSONNET, C., SAVE M., *Calcul Plastique des Constructions, Vol. 1, Ossatures planes*. CBLIA. Bruxelles. 1961.
- MERY E., *Mémoire sur l'équilibre des voûtes en berceau*. Ann. Ponts et Chaussées, Paris 1840, 1e série, 1^{er} semestre, pp. 50-70.
- PADUART, A., *Introduction au calcul et à l'exécution des voiles minces en béton armé*. Eyrolles, Paris. 1961.

PEYRAMAURE M., *Quand Paris bâtissait Notre-Dame*. in Géo, 151 sept. 1991, pp. 88-94.

RECHT R., (sous la direction de). *Les bâtisseurs des cathédrales gothiques*. Musées de la Ville de Strasbourg, 1989.

RECHT R., *Le Dessin d'architecture*. Adam Biro, Paris, 1995.

SABOURET V., *Les voûtes d'arête nervurées. Rôle simplement décoratif des nervures*. Le Génie Civil, 1928, tome 92, n° 9, pp. 205-209.

SABOURET V. *L'évolution de la voûte romane du milieu du XIe siècle au début du XIIe siècle*. Le Génie Civil. 1934. tome 104, n°11, pp. 240-243.

SAVE M., *La théorie des charges limites et son application aux maçonneries*. In "Restauration des Ouvrages et des Structures" Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1983, pp. 249-280.

SAVE M., *La théorie des charges limites et son application aux maçonneries*. In "Stable-Unstable?", Lemaire, R.P. et Van Balen, K. éd., Leuven University Press, 1988, pp. 231-248.

SMARS P., *Etudes sur la stabilité des arcs et des voûtes. Confrontation des méthodes de l'analyse limite aux voûtes gothiques du Brabant*. Thèse de doctorat KUL, Leuven 2000.

TIMOSHENKO. S. P., *History of Strength of Materials*. Mc Graw Hill, New-York, 1953.

VAN BALEN K., VAN GEMERT D., *Modelling lime mortar carbonation*. Materials and Structures, 1994, 27, pp. 393-398.

VIOLLET-LE-DUC E., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*. 10 volumes, Paris, 1854-68.

WENZLER C., *Un défi médiéval. Les cathédrales gothiques*. Ed. Ouest-France, Rennes 2000.



Dossier réalisé par:
Pierre Halleux

ICOMOS
Wallonie - Bruxelles

Présidente :
Brigitte Libois

Secrétariat :
rue de l'Écluse, 22
6000 Charleroi
Tél 04 224 54 75
Fax 04 224 54 44

Contacts pour les publications:
Denise Barbason
Ministère de la Région wallonne
Montagne Ste - Walburge, 2
4000 Liège
Tél 04 224 54 75
Fax 04 224 54 44