

BRUXELLES PATRIMOINES



Une publication de la Région
de Bruxelles-Capitale



DOSSIER
L'ART DE CONSTRUIRE

N°003 - 004

SEPTEMBRE 2012



NUMÉRO SPÉCIAL
JOURNÉES DU PATRIMOINE
RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE



Avant le temps des ingénieurs

L'HISTOIRE DE QUELQUES DÔMES

BERNARD ESPION

Ingénieur et historien de la construction,
professeur, Université libre de Bruxelles

De tous temps, sauf peut-être à la période gothique, les structures architecturales qui ont posé les plus grands défis de construction et de stabilité aux architectes et aux ingénieurs furent les grands dômes, depuis les coupoles de la Rome antique jusqu'aux gigantesques structures légères utilisées pour couvrir les arènes olympiques de Séoul en 1988. L'histoire de ces coupoles, de la Renaissance à l'avènement des écoles d'ingénieurs au XIX^e siècle, permet également de comprendre la différenciation progressive des métiers de l'architecte et de l'ingénieur.

L'histoire des grands dômes, depuis le Panthéon romain, montre que leur conception, leur construction ou l'analyse *a posteriori* de leur stabilité en cas de déboires ont toujours constitué des étapes marquantes dans l'art de construire. Ces grandes structures véhiculent des modèles architecturaux qui ont été reproduits à échelle réduite en variations infinies: il n'est pas difficile d'en trouver de multiples exemples à Bruxelles à partir de la fin du XVII^e siècle.

LE TEMPS DES INGÉNIEURS

Une définition assez classique du temps des ingénieurs associe le début de cette période à la charnière entre les XVIII^e et XIX^e siècles. On y voit alors l'ingénieur comme l'un des acteurs de la révolution industrielle, dont le rôle est spécifiquement identifié. Sa formation s'appuie de plus en plus, à partir de 1800, sur les sciences qui se développent comme les mathématiques, la mécanique, la

chimie et la thermodynamique. La première école d'ingénieurs où l'enseignement de ces disciplines constitue la base de la formation est l'École Polytechnique, créée à Paris en 1794. Les premiers ingénieurs belges ayant bénéficié d'une formation académique l'ont reçue à Paris, comme par exemple Jean-Baptiste Vifquain diplômé de Polytechnique en 1814. En Belgique, la première école d'ingénieurs est créée à l'Université de Gand en 1838 et s'inspire du modèle de l'École centrale des Arts et Manufactures fondée à Paris en 1829.

L'ingénieur dans le domaine des constructions, de l'aménagement du territoire et des travaux publics est également l'utilisateur des nouveaux matériaux de la Révolution industrielle. Or le fer laminé ne commence à être produit en Belgique que sous le Régime hollandais. De même la première cimenterie à clinker établie en Belgique, à Cronfestu (Morlanwelz), ne date que de 1872; et sans ciment pas de béton au sens moderne du terme, et encore moins de béton armé. *Mutatis mutandis*, cette datation de l'apparition de l'ingénieur moderne en Belgique vers les années 1830 reste peu ou prou valable pour les autres pays européens. La seule exception notable est l'apparition, en Angleterre dès 1818 et en France dès 1823, d'un tout nouveau type de pont qui rompt avec la construction traditionnelle des ponts en maçonnerie et qui nécessite pour sa conception les compétences scientifiques de l'ingénieur moderne et le fer comme matériau structural: le pont suspen-

La différenciation entre les professions d'architecte et d'ingénieur ne se fait que très progressivement de la Renaissance à la fin du XVIII^e siècle.

du. D'ailleurs, il est à noter que Vifquain est le premier à introduire en Belgique le concept du pont suspendu avec la réalisation en 1824 d'une passerelle suspendue de 23 m de portée à Bazel dans la propriété des vicomtes Vilain XIII, le château de Wissekerke.

N'existe-t-il pour autant pas d'ingénieurs avant le XIX^e siècle? Le concepteur du pont du Gard n'est-il pas ingénieur? Les maîtres d'œuvre des cathédrales gothiques ne sont-ils pas ingénieurs tout autant qu'architectes? À l'évidence, si. Mais la différenciation entre les professions d'architecte et d'ingénieur ne se fait que très progressivement de la Renaissance à la fin du XVIII^e siècle. On peut la suivre selon trois grands axes: la spécialisation des domaines de construction, la spécialisation des connaissances et de la littérature professionnelle et, au XVIII^e siècle, la spécialisation des formations et des apprentissages.

À la Renaissance, en Italie, beaucoup d'ingénieurs et d'architectes font en fait le même métier et passent souvent de l'un à l'autre: ingénieurs lorsqu'ils s'occupent de fortifications et de machines, architectes lorsqu'ils édifient des palais ou des églises. Et la formation de base est souvent la même: c'est l'apprentissage dans un atelier. Plus tard, on réservera de plus en plus l'appellation d'ingénieur à la personne en charge des travaux du génie militaire et, au XVIII^e siècle, à celle en charge du génie hydraulique. L'architecte devient, quant à lui, le maître d'œuvre spécialisé dans la construction des bâtiments civils et religieux.

En France, la première institution technique consacrée à la construction est l'Académie royale d'Architecture fondée en 1671 à l'instigation de Colbert par François Blondel, ingénieur militaire et architecte de Louis XIV. Le corps des ingénieurs militaires est fondé en 1675 et l'École royale du Génie de Mézières en 1748. Le corps des ingénieurs des Ponts et Chaussées est créé en 1716 et l'École des Ponts et Chaussées en 1747 pour y former par le projet les ingénieurs en charge de l'aménagement du territoire. C'est en Angleterre, à la seconde moitié du XVIII^e siècle, qu'apparaissent spécifiquement la profession et la désignation d'ingénieur civil. Il est, au sens moderne du terme, un ingénieur conseil indépendant appelé à établir et à calculer la

rentabilité de projets d'aménagement de canaux, d'assèchement de marais, de construction de digues et de ports. Il est également le responsable de la réalisation de ces projets et en conçoit tous les équipements techniques, comme les pompes et les premières machines à vapeur. Il n'y a pas, à la différence de la France, de lieu spécifique de formation des ingénieurs; le métier s'acquiert par apprentissage auprès d'artisans ou d'ingénieurs. Le Siècle des Lumières voit un foisonnement dans toute l'Europe d'écoles de dessin ou d'académies d'art publiques ou privées, dont le nombre passe de dix-neuf en 1720 à plus de cent en 1790, dont une dizaine dans les Pays-Bas autrichiens. Ces académies sont évidemment le lieu de formation privilégié des architectes. L'Académie de Bruxelles, fondée à l'instigation de Charles de Lorraine en 1763, accueille une section d'architecture en 1766.

À la fin du Moyen Âge, à la veille de l'invention de l'imprimerie, le seul traité de construction connu est celui rédigé par Vitruve, probablement plus un ingénieur qu'un architecte, au 1^{er} siècle avant J.-C. Il était largement diffusé: pas moins de cinquante-cinq copies manuscrites, toutes sans illustrations, nous sont connues. Le *De Architectura* de Vitruve est le traité fondateur de tous les livres d'architecture, d'une part, et de tous les *compendiums* d'ingénierie de la construction, d'autre part. La première édition imprimée paraît en 1486 et la première à contenir des illustrations date seulement de 1550. S'il constitue un témoignage unique du savoir des bâtisseurs de l'Antiquité, le *De Architectura* n'en reste pas moins un livre de règles pratiques et de recettes empiriques. Mais c'est l'état des connaissances qui régit encore en grande partie la pratique des ingénieurs-architectes au XV^e siècle. En 1739, l'accumulation des connaissances présocratiques et l'expérience des ingénieurs sera condensée dans *La Science des Ingénieurs* de Bernard Forest de Bélidor (fig. 1), puis dans son *Architecture hydraulique* (1737-1753) qui vont faire autorité auprès des ingénieurs pendant près d'un siècle. Du côté des architectes, c'est le *Cours d'Architecture* en neuf volumes (1771-1777) publié par Jean-François Blondel, petit-fils

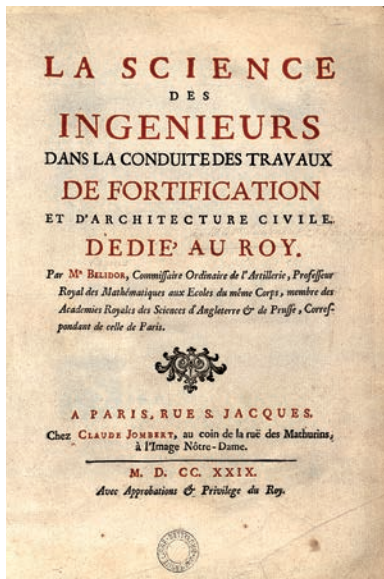


Fig. 1
 FOREST DE BELIDOR, B.,
*La science des ingénieurs dans
 la conduite des travaux de
 fortification et d'architecture
 civile*, Paris, 1729 (© ULB,
 Réserve précieuse).

INGÉNIEUR

Ingénieur vient du latin *ingenium* qui pourrait provenir de *geno*, signifiant un « caractère inné, naturel » ou encore « génie, disposition naturelle de l'esprit ». Au XII^e siècle, apparaît le terme *ingeniator* et au XIII^e *ingeniosus*, se rapportant tous les deux à un artisan spécialiste de la guerre. À la même époque, le sens médiéval du mot *ingenium* devient « engin » en français et l'ingénieur désigne alors un concepteur de machines.

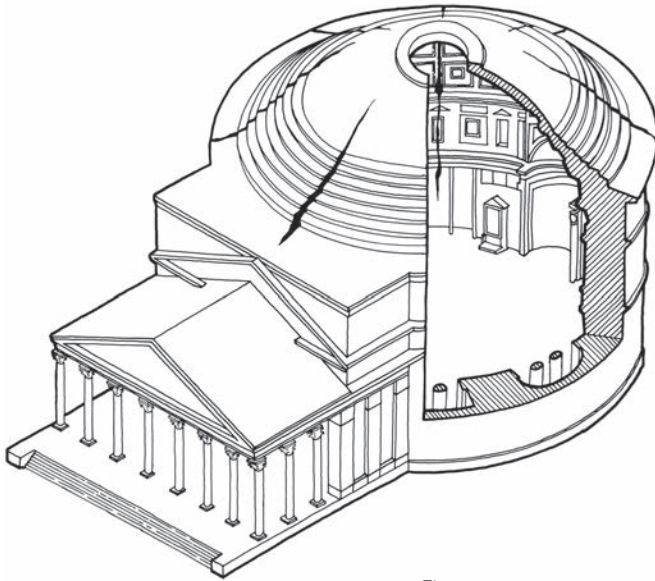
de François Blondel, qui devient la référence standard de son temps. Malgré la différenciation qui s'établit ainsi progressivement entre l'architecte et l'ingénieur, il n'en demeure pas moins que, même à la fin du XVIII^e siècle, les métiers peuvent rester très proches. À l'École des Ponts et Chaussées sous l'Ancien Régime, et même encore à Polytechnique au début du XIX^e siècle, l'enseignement de l'architecture et la pratique du projet d'architecture constituent une part importante de la formation des futurs ingénieurs: l'ingénierie, au même titre que l'architecture, fait partie des arts frontières entre les arts mécaniques et les arts libéraux.

il est assez clair que Bruxelles, qui était au XIX^e siècle une petite ville à l'échelle européenne, ne peut se targuer d'avoir été un lieu d'expérimentations ayant contribué à l'enrichissement de l'art de construire avant le XX^e siècle. Néanmoins, comme on le verra en conclusion, il est possible de trouver dans le patrimoine bruxellois des constructions réalisées depuis le XVIII^e siècle qui renvoient par certains aspects, essentiellement symboliques, à la tradition de ces grandes constructions.

Il est assez tentant de voir dans les mégastructures de chaque époque les constructions qui répondent à cette définition de l'art de construire. Si l'on met à part l'époque gothique, durant laquelle l'audace des bâtisseurs se concrétise dans les voûtes sur croisée d'ogives et les arcs-boutants des cathédrales, il est significatif que, depuis l'époque romaine jusque même au début du XX^e siècle, ces structures hors normes ont toujours été des dômes ou des coupoles. L'explication rationnelle donnée par l'ingénieur moderne est que le dôme est la forme structurale qui permet, avec des matériaux comme la maçonnerie ou le bois, de couvrir les plus grandes portées sans appuis intermédiaires, et cela grâce à leur fonctionnement tridimensionnel, à la différence de celui, bidimensionnel, des arcs et des poutres.

.....
L'ART DE CONSTRUIRE...
LES DÔMES

Il ne saurait être question ici de se lancer dans un panorama général de l'art de construire avant 1830. Ceci est du ressort des encyclopédies d'histoire des techniques ou d'histoire de l'art de bâtir. Notre propos envisagera la notion de « Grand Art », c'est-à-dire que nous nous intéresserons aux constructions remarquables qui, chacune à leur époque, ont présenté des défis aux constructeurs qui les concevaient et les édifiaient et qui constituent des jalons marquants dans l'évolution du savoir constructif. Suivant ce fil conducteur,

**Fig. 2**

Perspective et coupe du Panthéon romain avec indication de la fissuration naturelle, fortement exagérée, des dômes en maçonnerie (MARK, R. (éd.), *Architectural Technology up to the Scientific Revolution. The Art and Structure of Large-Scale Buildings*, The MIT Press, 1995).

Les coupoles antiques

L'histoire retient comme premier grand dôme un chef d'œuvre de la construction romaine: le Panthéon dit d'Agrippa, à Rome, terminé sous le règne d'Hadrien en 123 de notre ère. Il s'agit d'un dôme de 43 m de diamètre intérieur en maçonnerie concrète, c'est-à-dire une sorte de béton où le liant n'est pas du ciment artificiel, mais de la chaux. L'ou-

L'histoire retient comme premier grand dôme un chef d'œuvre de la construction romaine: le Panthéon dit d'Agrippa, à Rome, terminé sous le règne d'Hadrien en 123 de notre ère.

vrage est exceptionnel, et il va falloir attendre plus de quatorze siècles pour qu'un autre dôme dépasse cette ouverture, et le début du XX^e siècle pour que celle-ci soit dépassée par un dôme en béton armé. On en est réduit à des

conjectures, comme souvent pour les constructions de l'Antiquité, quant aux méthodes utilisées pour construire ce dôme. L'analyse pétrographique semble néanmoins indiquer que le poids spécifique de la maçonnerie diminue en s'élevant des murs jusqu'à l'oculus au sommet du dôme, ce qui tendrait à dénoter une intuition du fonctionnement structural chez le concepteur. La forte épaisseur des murs du tambour et des naissances de la coupole, ainsi que la présence de fissures radiales dans le dôme, semblent assez clairement indiquer que cette maçonnerie, à

la différence de tous les dômes en maçonnerie construits à partir de la Renaissance, n'est pas renforcée par des armatures. En effet, dans une coupole, l'état naturel de sollicitation sous poids propre induit dans les parties basses du

dôme des efforts de traction qui s'exercent suivant les cercles parallèles ou lignes de niveaux, qui ont donc tendance à créer dans la maçonnerie des fissures qui naissent à partir de la base du dôme et se propagent radialement vers son sommet, perpendiculairement aux lignes méridiennes (fig. 2). Cette fissuration de la maçonnerie modifie la distribution des efforts internes par rapport à l'état non fissuré. Si le dôme n'est pas ceinturé à sa base par un chaînage circonférentiel horizontal*, la base du dôme induit une poussée importante sur les murs du tambour qui supportent le dôme et qui doivent soit être très épais, soit être soutenus par des contreforts.

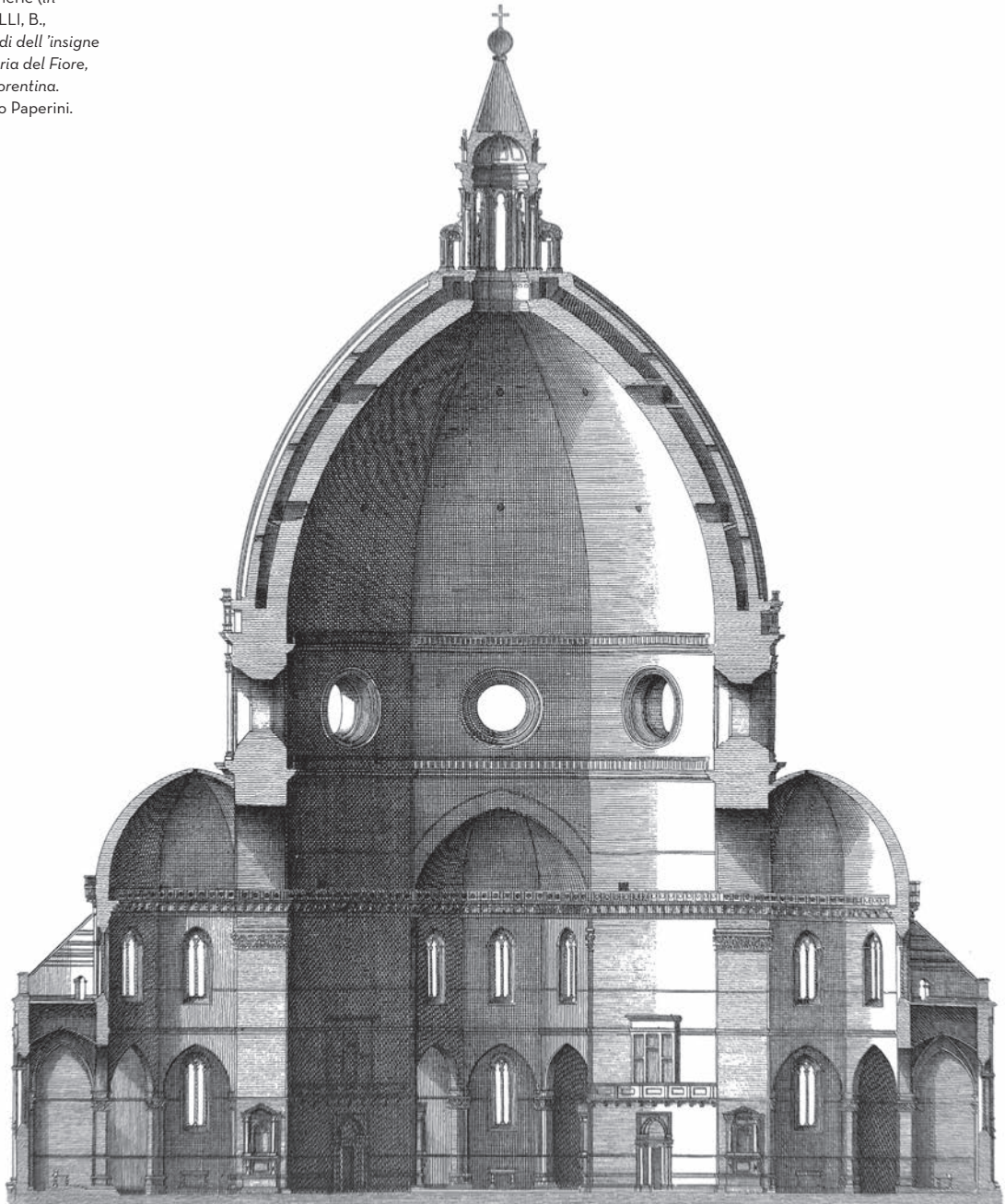
Le dôme de Sainte-Sophie à Constantinople est une autre grande coupole issue de l'Antiquité qui, dans sa structure actuelle date du VI^e siècle. Avec un diamètre à la base de seulement 31 m, sa portée est nettement moindre que celle du Panthéon, quoiqu'elle recouvre finalement un espace libre beaucoup plus grand. Il s'agit ici d'un dôme en maçonnerie de brique et non armé, dont on peut être quasi certain, à l'instar du Panthéon romain, qu'il a nécessité pour sa construction un cintre* en bois. Comme Sainte-Sophie était, jusqu'à la chute de l'Empire byzantin en 1453, l'église phare de la Chrétienté, ce dôme est important pour la typologie architecturale qu'il a induite pour la couverture des églises chrétiennes d'Orient, y compris orthodoxes, et par ailleurs aussi celle des mosquées.

Le dôme de la cathédrale de Florence

Après la construction romane, puis gothique qui a marqué l'architecture médiévale, apparaît subitement à la Renaissance italienne l'extraordinaire structure que constitue la coupole de la cathédrale Sainte-Marie-de-la-Fleur à Florence (fig. 3). Lorsque Filippo Brunelleschi en reçoit la maîtrise d'œuvre à la suite d'un concours en 1420, il hérite de contraintes que lui ont laissées les constructeurs qui l'ont précédé sur le chantier: les murs du tambour à la croisée du transept sont déjà construits et déterminent le plan octogonal de la coupole

Fig. 3

Coupe de la cathédrale de Florence montrant la double coque en maçonnerie (in SANSONE SGRILLI, B., *Descrizione e studi dell'insigne fabbrica di S. Maria del Fiore, metropolitana Fiorentina*. Firenze, Bernardo Paperini, 1733).



60 100
Scala di p. 100. Romani

10 20 30 40 50
Scala di bruc. 50 Fiorentina

Taglio del medesimo Tempio fatto Sulla Linea IK della Figura II.

DÔME OU COUPOLE?

Le dôme et la coupole sont similaires tant dans la forme que dans leur fonctionnement structural. C'est pourquoi dôme et coupole sont souvent pris pour synonymes, même si la coupole est généralement considérée comme l'intrados de la voûte et le dôme comme l'extrados. Dans les deux cas, il s'agit d'une surface continue à courbure concave vers le bas soutenue par un plan circulaire ou elliptique, parfois polygonal. Certaines coupoles présentent une ouverture centrale importante, l'*oculus*, sans que cela n'entraîne leur fonctionnement structural.

ainsi que les dimensions de sa base. Ils avaient donc probablement en tête comme modèle de dôme qui devait surmonter la cathédrale de Florence celui du baptistère voisin qui datait du XII^e siècle. Cependant, l'échelle de la taille du dôme de la cathédrale était tout autre et sans précédent. Le défi était donc énorme pour les constructeurs. De Brunelleschi, on sait qu'il a fait son apprentissage dans un atelier d'orfèvrerie, et qu'avant d'être désigné pour construire le dôme de la cathédrale en 1420, il avait travaillé comme ingénieur pour des constructions militaires et comme architecte pour des projets civils. Et pendant la durée des travaux du dôme de la cathédrale, il s'occupait en même temps de la construction de fortifications et d'églises dans la région de Florence.

Si Brunelleschi est devenu l'ingénieur-architecte de la coupole, c'est qu'il a su convaincre ses commanditaires qu'il la réaliserait sans recours à aucun cintre* ni échafaudage prenant appui sur le sol de la cathédrale. Obsédé par la conservation du secret de son art, il ne divulgue aucun détail sur les moyens et techniques qu'il compte mettre en œuvre. L'analyse archéologique moderne des caractéris-

Le succès de la construction du dôme de la cathédrale de Florence réside plus que probablement dans la machinerie ingénieuse des engins de levage conçus par Brunelleschi.

tiques structurales et constructives du dôme permet de confirmer la faisabilité de ce projet grâce à des dispositions innovantes. Tout d'abord, le dôme, dont le diamètre du cercle inscrit à l'intérieur de l'octogone est de 42 m (45,5 m entre sommets de l'octogone) est constitué d'une double coque en maçonnerie de briques. L'épaisseur de la coupole intérieure est de 2,2 m et l'épaisseur totale des deux coupoles de 4,2 m. Les deux coupoles sont solidarisées par des nervures radiales, la coque extérieure étant construite en prenant appui sur la coque intérieure. Ensuite, second point très important, l'appareillage des briques, de taille

tout à fait particulière, est d'un type spécial dit en arête de poissons qui permet de construire des lits horizontaux de maçonnerie qui, avec le mortier *ad hoc*, peuvent tenir en équilibre sans le support d'un cintre*. Enfin des chaînages horizontaux de pierre, de chêne, et probablement de fer également, renforcent la maçonnerie vis-à-vis de la fissuration qui est cependant très modérée dans le cas de ce grand dôme. Sa construction est achevée en 1436. Il ne reste plus alors qu'à le surmonter de l'imposante lanterne qui constitue une appréciable charge. Brunelleschi en établit le projet mais ne verra pas la fin de sa réalisation de son vivant.

Le succès de la construction du dôme de la cathédrale de Florence réside plus que probablement dans la machinerie ingénieuse des engins de levage conçus par Brunelleschi. Il est probable, malgré les précautions de secret et de discrétion dont il s'entourait, que ces engins novateurs aient suscité l'intérêt des ingénieurs du *Quattrocento* et que des croquis en aient été réalisés. Il existe en tout cas quelques dessins de ces machines de levage utilisées dans la cathédrale, exécutés par le jeune Leonardo da Vinci avant 1480 (fig. 4). Il avait eu l'occasion de les découvrir *de visu* dans la cathédrale, en 1469, alors qu'il était en apprentissage dans l'atelier de l'orfèvre Andrea del Verrochio, qui avait reçu la commande de la sphère

en cuivre culminant au sommet de la lanterne. Leonardo da Vinci est le plus remarquable de tous les esprits universels de la Renaissance dont les intérêts embrassent l'ingénierie, les sciences et les arts. Sa principale occupation professionnelle était plutôt l'ingénierie militaire et civile. Il était en même temps praticien de l'art de construire et expérimentateur pour développer de nouveaux savoirs. Son attitude très moderne, qui insiste sur la compréhension scientifique, est un grand pas en avant par rapport aux conceptions médiévales du projet uniquement fondées sur des règles géométriques absconses. Il est le premier à nous laisser

quelques pistes sur le fonctionnement des matériaux et des structures et à utiliser une représentation de forces sous forme géométrique pour appréhender le fonctionnement d'une voûte. Ses idées et sa pratique étaient en avance sur son temps et, à la différence de Brunelleschi, il a laissé quelques 5.300 dessins annotés.

Le dôme de la basilique Saint-Pierre à Rome

À la Renaissance, les professions d'architecte et d'ingénieur sont encore très proches. Certes, Léon Battista Alberti passe pour un architecte, quoique de maigre renom, mais il est surtout connu pour la rédaction, achevée vers 1452, de son *De Re Aedificatoria*. Il s'agit du premier traité de construction depuis Vitruve, dont il s'inspire d'ailleurs fortement, paru en édition posthume en 1485. Par contre, la figure de Michelangelo Buonarroti, mieux connu sous le nom de Michel-Ange, est beaucoup plus caractéristique de ces ingénieurs-architectes-artistes ayant bénéficié d'une formation professionnelle par apprentissage. On comprendrait en effet difficilement qu'à l'âge de 72 ans, en 1547, Michel-Ange ait reçu la commission de la construction du dôme de la basilique Saint-Pierre à Rome uniquement sur base de ses qualités d'artiste et de sculpteur en ignorant qu'il avait également derrière lui une carrière d'architecte et d'ingénieur militaire, ayant travaillé sur les fortifications de Rome et de Florence. Avant l'intervention de Michel-Ange, l'idée de voûter la croisée du transept par un dôme était déjà bien présente lorsque l'architecte Bramante établit les plans de la nouvelle basilique en 1506. Son projet pour le dôme était une copie du Panthéon romain, c'est-à-dire un dôme alvéolé relativement massif en béton. À son décès, les quatre grands piliers et les arcs destinés à supporter le dôme étaient construits. Plusieurs architectes se succèdent alors entre 1514 et 1547 sans que la construction du dôme ne progresse. Le projet de Michel-Ange est tout à fait différent: il prend comme modèle le dôme de la cathédrale de Florence, c'est-à-dire celui d'une double coque en maçonnerie de brique, dont le diamètre intérieur, dicté par l'existence des piliers

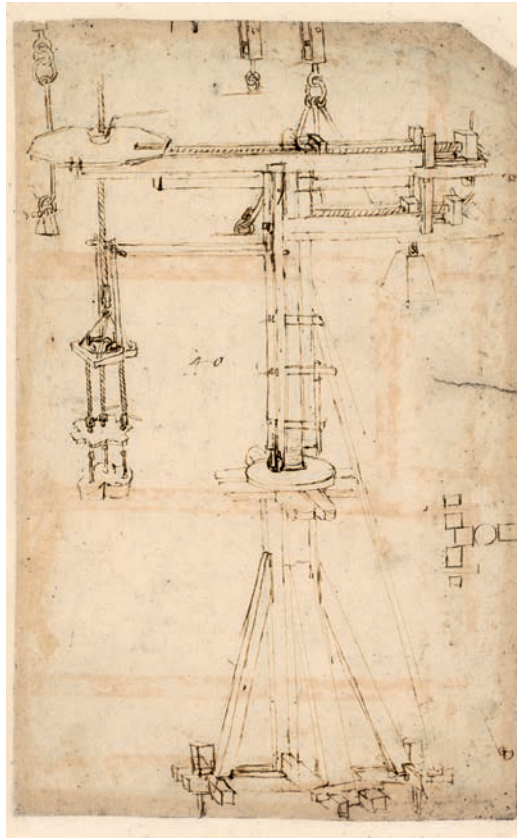


Fig. 4

Grande grue à contrepoids conçue par Brunelleschi, dessinée par Leonardo da Vinci (*Codex Atlanticus*, Bibliothèque Ambrosiana, Milan).

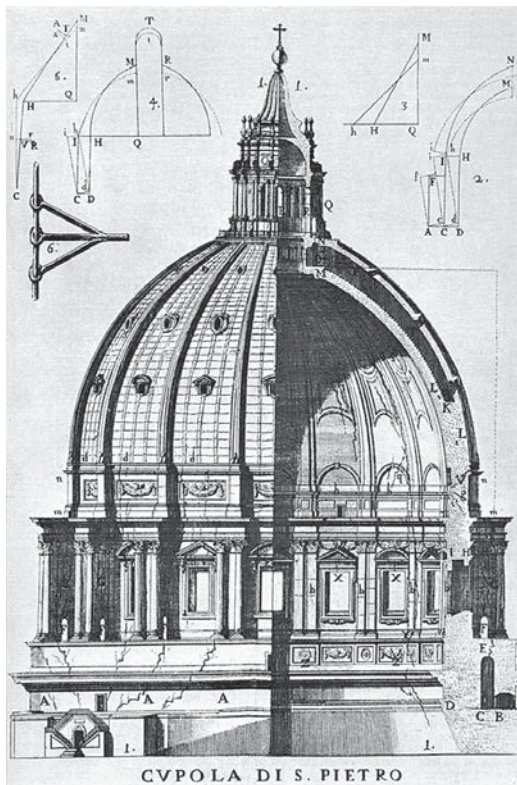


Fig. 5

Coupe de la coupole de Saint-Pierre avec indication des fissurations dans le dôme et le tambour (in POLENI, G., *Memorie istoriche della gran cupola del tempio Vaticano, e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro, divise in libri cinque. Alla santità di nostro signore papa Benedetto XIV*, Padoua: Stamperia del Seminario, 1748 © Bibliothèque nationale de France).

déjà construits, est de 41,5 m. La grosse différence entre ces deux dômes est que celui de Saint-Pierre est hémisphérique, et donc basé sur un plan circulaire et non octogonal comme à Florence. À la mort du maître, son projet est repris et un peu modifié par les architectes Giacomo della Porta et Domenico Fontana (fig. 5). Sous la direction de ce dernier, le dôme est édifié rapidement de 1588 à 1590. Sa structure inclut alors deux chaînages circonférentiels* en fer, l'un, à la base du dôme et l'autre, au niveau où les deux coques se séparent. Les coques sont reliées par des nervures. Bien que le dôme eût pu être construit sans cintre* et qu'aucun témoignage direct n'en montre l'utilisation, des indices laissent supposer que la construction du dôme s'est faite sur cintre*. Ici aussi, il n'est pas sans intérêt de rappeler que Fontana est le maître d'œuvre de l'un des plus remarquables défis d'ingénierie de la Renaissance: le relèvement de l'obélisque de 927 tonnes au centre de la place Saint-Pierre en 1586, qui nécessita toutes ses connaissances de la statique pour concevoir les treuils et une force de traction procurée par 900 hommes et 75 chevaux. Le dôme de la basilique Saint-Pierre va servir de référence esthétique et symbolique pour tous les dômes à construire sur les églises baroques à partir du XVII^e siècle.

Palladio

Une autre source de la typologie architecturale du dôme est l'œuvre d'Andrea Palladio qui publie en 1570 ses *Quattro libri dell'architettura*, probablement le plus influent de tous les traités d'architecture de la Renaissance et qui est rapidement disséminé en Europe. Même si Palladio a construit des ponts, d'ailleurs illustrés dans le livre troisième, domaine traditionnel de l'ingénieur, ce traité marque assez nettement le début de la séparation entre architecte et ingénieur par la concentration de son objet sur les styles et la décoration, et par le peu d'intérêt porté aux matériaux et aux techniques de construction. Dans le livre quatrième, Palladio décrit de nombreuses coupes antiques. Il réalise lui-même quelques dômes en maçonnerie de belles dimensions à partir de 1566, pour des églises ou des villas. C'est donc très probablement à l'influence de

Palladio, alimenté par l'architecture romaine antique, qu'il faut faire remonter le style de la coupole dans l'architecture néoclassique et civile.

RATIONALISATION DES SAVOIRS

Le milieu du XVI^e siècle voit apparaître, avec le développement du commerce, la nécessité de construire des canaux ou de rendre les rivières navigables. Ici aussi, les ingénieurs italiens de la Renaissance, avec l'aménagement de canaux en Lombardie, sont les maîtres. Cependant il faut souligner le canal de Bruxelles au Rupel, construit à partir de 1550, qui constitue, avec ses quatre écluses, l'un des canaux importants de cette époque. De cette période des *Quattrocento* et *Cinquecento*, l'histoire n'a essentiellement retenu que le nom des architectes et des ingénieurs qui ont laissé des écrits ou qui ont eu à diriger les chantiers phares de leur époque. Ils représentent la pointe de l'iceberg d'un ensemble qui a compté en Europe des milliers de personnes qui, compte tenu des conditions d'exercice de leur profes-

À la fin du XVI^e siècle, l'intérêt pour l'utilisation des mathématiques dans l'ingénierie et la construction augmente, mais il n'existe à cette époque encore aucun cadre scientifique et aucun modèle théorique applicable au dimensionnement des structures.

sion, voyageaient, se parlaient et échangeaient leurs expériences pratiques. À la fin du XVI^e siècle, l'intérêt pour l'utilisation des mathématiques dans l'ingénierie et la construction augmente, mais il n'existe à cette époque encore aucun cadre scientifique et aucun modèle théorique applicable au dimensionnement des structures ou à la réalisation des travaux hydrauliques. Et il va falloir encore deux cents ans, jalonnés de plusieurs découvertes marquantes, pour commencer à doter l'ingénieur de quelques modèles de dimensionnement rationnels fondés sur certaines bases scientifiques.

La première étape a sans doute été, pour appréhender correctement l'équilibre des éléments de construction,

l'utilisation de la géométrie pour représenter les forces et la notion de parallélogramme des forces. On crédite souvent l'ingénieur et mathématicien, né à Bruges, Simon Stevin de cette invention et d'être le «père de la statique» avec son travail sur l'hydrostatique et la statique *De beghinselen der weeghconst* publié en 1586. Toute sa vie, Stevin a été ingénieur construisant aux Pays-Bas des moulins, des écluses et des ports, conseillant le *Stathouder* Maurice de Nassau dans la construction des fortifications durant la guerre contre l'Espagne, imaginant les moyens d'inonder les polders au moyen de vannes ouvertes sélectivement dans les digues.

Le physicien Galileo Galilei est le tout premier à distinguer la résistance du matériau -propriété intrinsèque- de la résistance de la structure faite de ce matériau dans le premier de ses *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze attenanti alla mecanica & i movimenti locali* publiés à Leyde en 1638. Certaines de ses conclusions sont correctes, d'autres pas. La représentation du problème

de détermination de la capacité portante de la poutre en bois encastree dans le mur en maçonnerie est très célèbre (fig. 6). Elle correspond certainement à une expérience plus théorique que réellement pratiquée par Galilée car il

est évident que dans une telle expérience, c'eût été le mur qui se serait effondré bien avant de rompre la poutre. Par ailleurs, pour ce problème-là, la solution mathématique de Galilée est incorrecte car elle viole une des conditions fondamentales de l'équilibre des forces. Néanmoins, c'est dans ce traité de 1638, en rupture avec l'approche médiévale, qu'il faut rechercher les prémices du dimensionnement scientifique des structures. Les travaux de Galilée sont lus dans toute l'Europe et débattus par l'élite scientifique de son temps.

Parmi les autres événements qui contribuent au progrès des connaissances scientifiques, y compris appliquées à



Fig. 6

GALILEI, G., *Discorsi, e dimostrazioni matematiche: intorno à due nuove scienze, attenenti alla mecanica, & i movimenti locali/ del Signor Galileo Galilei...*; con un'appendice del centro di gravità d'alcuni solidi. Bologna, Per gli HH. del Dozza, 1655 (© ULB, Réserve précieuse).

l'art de construire, figure la création des grandes académies: la Royal Society à Londres en 1662 et l'Académie des Sciences de Paris en 1666. Deux membres actifs de la toute jeune Royal Society vont avoir une influence considérable sur la façon d'appréhender la construction: Christopher Wren et Robert Hooke. Commenant tous deux leur carrière par une solide formation scientifique à Oxford, qui fait d'eux d'abord des professeurs d'astronomie, de mathématiques ou de physique, ils se font architectes à la faveur des projets qui s'inscrivent dans la reconstruction de Londres après le grand incendie de 1666. Ce seront des architectes d'un nouveau type: ni maçons opératifs formés sur les chantiers, ni ingénieurs militaires, ni gentlemen-architectes

formés par l'étude d'Alberti et de Palladio et des monuments classiques. Ce seront les premiers constructeurs qui disposent d'une culture en mathématiques et en mécanique qui leur vient de leur formation universitaire et de leur fréquentation de la Royal Society.

Le dôme de la cathédrale Saint-Paul à Londres

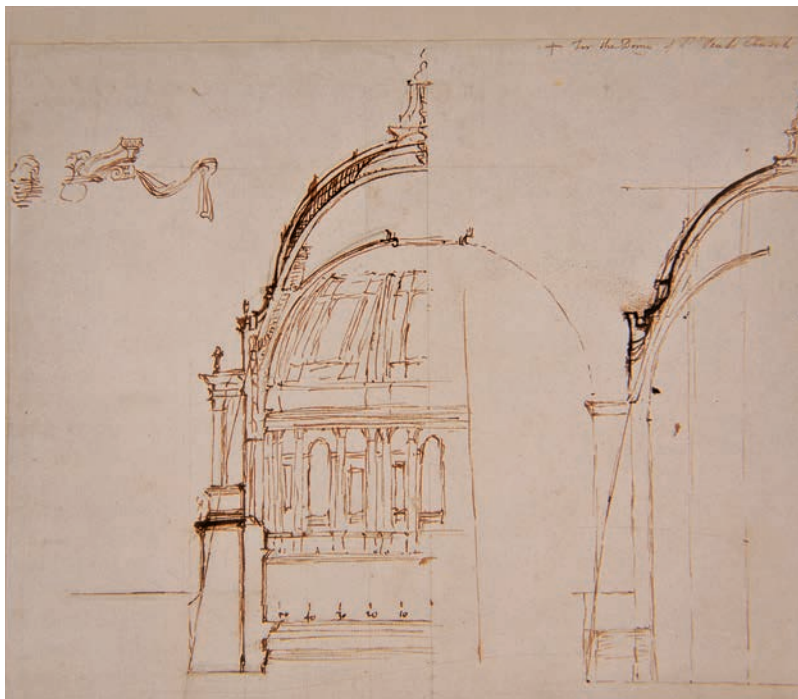
Dès 1668, Christopher Wren est associé à la reconstruction de la cathédrale anglicane Saint-Paul de Londres, qui a considérablement souffert du grand incendie. Il en devient le maître d'œuvre en 1678. Pour le dôme, il faut réaliser une structure qui puisse rivaliser avec celui de Saint-Pierre, mais il y a des contraintes. La crainte justifiée de tassements différentiels des fondations

exige un dôme léger, qui par ailleurs doit être construit rapidement car le climat de Londres ne permet pas une trop longue exposition à l'air libre des échafaudages et du cintre* en bois.

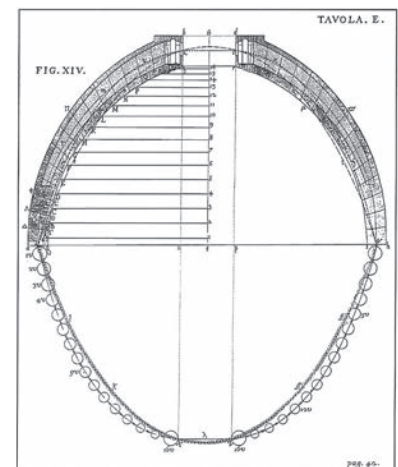
Le dôme de Saint-Paul, conçu par Wren et réalisé de 1705 à 1708, est composé de trois coupoles (fig. 7). Tout d'abord, la coupole intérieure en maçonnerie de briques de forme hémisphérique, d'un diamètre intérieur 30,8 m, est percée en son sommet d'un oculus. La deuxième coupole est un tronc de cône en briques de 46 cm d'épaisseur qui supporte en son sommet l'imposante masse de la lanterne pesant 700 tonnes. Ces deux dômes, particulièrement le tronc de cône, sont armés de chaînages en fer déposés dans des lits de pierre,

**Fig. 7**

Coupe de la cathédrale Saint-Paul montrant la triple structure du dôme. Gravure de Samuel Swayle et John Gwynn, 1755 (© Guildhall Library).

**Fig. 8**

Épure d'un tracé de ligne de poussée attribué à Wren pour un projet de coupole pour Saint-Paul (© The Trustees of the British Museum).

**Fig. 9**

Analyse de la stabilité du dôme de Saint-Pierre au moyen de l'analogie de la chaîne pendante (POLENI, G., *Memorie istoriche della gran cupola del tempio Vaticano, e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro, divise in libri cinque. Alla santità di nostro signore papa Benedetto XIV, Padoua: Stamperia del Seminario, 1748* © Bibliothèque nationale de France).

de conception particulièrement étudiée pour prévenir la corrosion. La coupole extérieure est une structure en bois recouverte de feuilles de plomb.

Une épure provenant du cabinet de Wren et reconnue de sa main (fig. 8) laisse supposer que la forme des dômes en briques a pu être déterminée en faisant usage d'un principe important de l'équilibre des voûtes en maçonnerie énoncé pour la première fois par Robert Hooke à la *Royal Society* en décembre 1670. S'il l'a énoncé publiquement, il

Wren eut une carrière d'architecte bien remplie puisqu'en même temps qu'il construisait Saint-Paul, il est crédité, entre autres, de la construction de 53 églises.

n'en a jamais fourni la démonstration et ne l'a publié, en 1675, que sous la forme cachée d'un paradigme en latin qui s'énonce «*Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum*» qui pourrait être traduit par : «comme pend une ligne flexible, ainsi, mais inversé, se tiendra un arc rigide». Ce qui, en termes plus précis et plus compréhensibles, signifie que la forme géométrique qui permet à un arc en maçonnerie de se tenir en équilibre est la même, en figure miroir, que celle d'une ligne caténaire soumise aux mêmes sollicitations, mais inversées (fig. 9). L'épure en question semble indiquer une esquisse de tracé d'une «ligne de poussée», ce qui constituerait une première application d'un principe scientifiquement fondé au dimensionnement d'une coupole et de ses renforcements. Il est cependant à noter que ce principe d'application pour les arcs dont le fonctionnement est plan ou bidimensionnel n'est pas immédiatement transposable aux coupoles, dont le fonctionnement est spatial ou tridimensionnel.

Wren eut une carrière d'architecte bien remplie puisqu'en même temps qu'il construisait Saint-Paul, il est crédité, entre autres, de la construction de 53 églises. La carrière de Hooke en tant qu'architecte, quoiqu'il fut avec Wren l'un des trois commissaires à la reconstruction de Londres, est moins passée à

la postérité, mais, des deux amis, il était sans doute le plus ingénieur. La science de la résistance des matériaux lui doit l'énoncé d'un autre principe fondamental en 1678, *ut tensio, sic vis*, c'est-à-dire, en termes modernes, «l'observation que la déformation d'une structure est proportionnelle à la sollicitation appliquée». Hooke, homme aux multiples talents, était également fabricant d'instruments scientifiques et l'élément de structure pour lequel il énonce ce principe est le ressort. Cette hypothèse est à la base de la théorie de l'élasticité

des corps solides développée au XIX^e siècle et qui reste l'un des principes fondamentaux actuels de dimensionnement des constructions. Est-ce parce que Saint-Paul a été construit en tenant compte de quelques idées scientifiques que ce dôme, à l'instar de celui de Rome, s'est bien comporté? Ce serait une explication qui flatterait bien l'ingénieur moderne, mais rien ne permet de l'affirmer.

Deux célèbres expertises de pathologie

L'ampleur des fissures apparues dans le dôme de Saint-Pierre de Rome fait naître, dès 1680, des doutes sur sa stabilité. Les craintes s'accroissent après le tremblement de terre de 1730 et l'architecte-ingénieur Luigi Vanvitelli, après un relevé détaillé des fissures (voir fig. 5), recommande un certain nombre de mesures de renforcement en 1742, dont l'addition de trois à quatre nouveaux chaînages de fer en supplément des deux d'origine pour aider à contenir la poussée du dôme fissuré sur les murs du tambour. Ce genre de mesure a déjà été appliqué sur d'autres dômes fissurés, mais de dimensions plus modestes. Le pape Benoît XIV, qui est au courant de l'évolution des idées au sujet de la mécanique des structures, confie une mission d'expertise à une commission composée de trois des meilleurs mathématiciens de l'époque: Thomas Le Seur, François Jacquier et Ruggiero Boscovich. Leur rapport *Parere di tre matematici sopra i danni, che si sono trovati nella cupola di S. Pietro*, publié en 1743, est un jalon très important dans l'histoire de

CALCULER LA STABILITÉ

À la fin du XVIII^e siècle, les problèmes de stabilité des constructions auxquels se sont intéressés les constructeurs ou les scientifiques académiciens sont de quatre types: la capacité portante des poutres, la force portante des colonnes, l'équilibre des arcs en maçonnerie et la stabilité des murs de soutènement. Un savoir pratique important a été accumulé et quelques écrits fondateurs ont été publiés, mais aucune solution scientifiquement correcte ou satisfaisante n'est disponible pour ces problèmes à l'aube du XIX^e siècle.

l'analyse du comportement des structures. Sur base de l'observation du schéma de fissuration, ils élaborent des modèles fondés sur la notion de mécanisme avec des parties du dôme tournant les unes par rapport aux autres le long de lignes d'articulation formées par les fissures (voir fig. 5). Ces modèles leur permettent d'estimer la poussée du dôme sur les murs et ils en concluent à la nécessité de les renforcer au moyen de cerclages en fer dont ils calculent la section. Sans le savoir, ils ont appliqué une approche mathématique d'analyse de la stabilité qui ne sera validée dans un cadre scientifique unifié qu'à la seconde moitié du XX^e siècle, appelée «estimation de la capacité portante par application de la méthode cinématique de l'analyse limite». Immédiatement après la remise et la publication du *Parere*, le pape sollicite un autre avis qu'il demande au physicien, mathématicien et naturaliste, mais aussi versé en question d'ingénierie hydraulique et d'architecture, Giovanni Poleni. Lui aussi va produire une étude remarquable et originale dont les conclusions sortent en 1743 et qui sera publiée en 1748 sous le titre *Memorie storiche della gran cupola del Tempio Vaticano*. Rejetant l'approche de ses prédécesseurs, il recourt à une modélisation certainement inspirée du principe énoncé par Hooke. Il imagine le dôme découpé par la fissuration en cinquante quartiers de lune, chaque quartier fonctionnant comme un arc plan. Il recherche la géométrie de la ligne de poussée dans les arcs par l'analogie expérimentale de la chaîne pendante (voir fig. 9); un principe

qu'utilisera encore Antoni Gaudi pour projeter les voûtes en béton de la *Sagrada Familia* de Barcelone plus de cent cinquante ans plus tard. Constatant que la ligne de poussée se situe à l'intérieur de la géométrie du dôme, Poleni en conclut que celui-ci peut trouver, même fissuré, un équilibre stable. Lui aussi, sans le savoir, a appliqué une approche mathématique d'analyse de la stabilité, appelée «estimation de la capacité portante par application de la méthode statique», qui ne sera validée qu'à la fin du XX^e siècle dans le même cadre scientifique unifié de l'analyse limite. Malgré ses conclusions qui n'auraient pas dû conduire à l'ajout de renforcement, Poleni recommande de façon non convaincante leur placement comme prévu dans le rapport des trois mathématiciens, ce qui sera fait par Vanvitelli entre 1743 et 1744.

On peut donc dire que les méthodes utilisées en 1742-1743 dans l'expertise de la stabilité de Saint-Pierre introduisent une innovation radicale et très moderne dans l'histoire de la compréhension du fonctionnement structural des constructions en maçonnerie. Ceci ne veut pas pour autant dire qu'elles passent dès l'époque

Le dôme de Sainte-Geneviève est triple, réalisé comme celui de Saint-Paul de trois coupes emboîtées les unes dans les autres, mais le diamètre intérieur n'est ici que de l'ordre de 20 m. Le dôme d'un poids considérable reporte pas moins de trois mille tonnes sur chacun des quatre piliers hauts de 38 m soutenant le tambour du dôme.

dans la pratique courante du calcul des voûtes, loin de là. Par ailleurs, si, comme il a été dit, il existe une similitude structurelle entre le dôme de Saint-Pierre de Rome et celui de Sainte-Marie-de-la-Fleur de Florence, il faut se poser la question de l'origine des désordres qui se sont manifestés à Rome et beaucoup moins à Florence. Mainstone¹ fait la constatation qu'à Florence, il y eut continuité du contrôle et aucun changement ni d'architecte, ni de conception durant

la construction du dôme, alors qu'à Rome, la construction procéda par alternances de phases d'absence de travaux et de construction frénétique, avec de longues périodes d'inactivité sur le chantier au gré des financements disponibles, des changements de pape et d'architecte, induisant des modifications profondes de la conception du dôme et de longues périodes d'exposition aux intempéries de la maçonnerie non achevée.

Le deuxième cas de pathologie célèbre qui mérite qu'on s'y attarde pour les enseignements qu'il apporte est celui des déboires qui jalonnent l'histoire de la construction de l'église Sainte-Geneviève, plus tard le Panthéon français, à Paris. La grande église à construire sur la montagne Sainte-Geneviève est voulue par Louis XV qui souhaitait un monument prestigieux. La commission en échoit en 1755 à un architecte en faveur, Jacques Germain Soufflot, et la première pierre est posée par le roi en 1764. Soufflot a fait le voyage en Italie et a bien étudié le Panthéon romain et Saint-Pierre. Mais la référence avec laquelle il faut rivaliser était Saint-Paul de Londres. Le dôme de Sainte-Geneviève est d'ailleurs triple, réalisé comme celui de Saint-

Paul de trois coupes emboîtées les unes dans les autres, mais le diamètre intérieur n'est ici que de l'ordre de 20 m. Le dôme d'un poids considérable reporte pas moins de trois mille tonnes sur chacun des quatre piliers hauts de 38 m soutenant le tambour du dôme. C'est sur ces piliers que se focalisent les problèmes et les querelles d'experts au XVIII^e siècle et non sur le dôme lui-même qui est fortement armé de pas moins de vingt-trois cercles métalliques.

La première salve de critiques est lancée en 1770 par Pierre Patte, un collaborateur de Blondel pour la rédaction de son *Cours d'Architecture*, qui prétend, en arguant des règles données par Bélidor pour les voûtes, que l'épaisseur des quatre piliers est insuffisante

pour soutenir le dôme prévu. Pour réfuter les thèses de Patte, Soufflot sollicite l'avis d'un éminent ingénieur des Ponts et Chaussées, Emiland Gauthey, qui lui donne raison sur la question de l'épaisseur plus que suffisante de ses piles dans son *Mémoire sur l'application des principes de la mécanique à la construction des voûtes et des dômes* publié en 1771. Il faut cependant préciser que l'analyse de Gauthey n'est pas pertinente d'un point de vue scientifique moderne. Voilà donc le problème soulevé par Patte réglé. Mais en 1776, au décentrement des arcs-doubleaux destinés à supporter la base du tambour, on observe déjà d'importantes fissurations dans les parements de pierre des quatre piliers. Les travaux se poursuivent. À la mort de Soufflot en 1780, ils sont repris par son collaborateur sur le chantier depuis 1769, Jean-Baptiste Rondelet, qui réalise le dôme de 1785 à 1790. En 1796, l'église Sainte-Geneviève devient, par décision de l'Assemblée nationale, le Panthéon français. Mais on redoute à nouveau l'écroulement de l'édifice et le ministre met en place une commission mixte d'experts, composée d'ingénieurs des ponts et chaussées et d'architectes. Les arcs-doubleaux sont ré-étaçonés. Durant les années 1797-1798, la commission est un lieu de querelles entre ingénieurs et architectes, par Gauthey et Rondelet interposés, sur les causes des désordres et les remèdes à apporter.

En fait, l'identification des causes ne pose pas beaucoup de problèmes: le médiocre remplissage de l'intérieur des piliers, qui ne peut reprendre aucune charge, et une mauvaise option pour l'appareillage du parement de pierre des piliers, pas de la meilleure qualité d'ailleurs, font que le parement de pierre est excessivement sollicité et éclate. Rétrospectivement, il est clair que Soufflot, sans doute soumis à la pression des contraintes financières, a pris de mauvaises options techniques relatives au choix des pierres de parement et à l'appareillage de la maçonnerie, et ne s'est pas suffisamment investi dans la surveillance du chantier et de l'entrepreneur en maçonnerie. Rondelet hérite donc d'une situation



Fig. 10

Paris, Halle au Blé lors des transformations de 1887 (© photothèque des Musées de la Ville de Paris).

viciée, mais honore trop la mémoire de son maître pour la critiquer. En 1800, une nouvelle commission est désignée, composée de membres de la section d'architecture de la classe des Beaux-Arts de l'Institut. De 1806 à 1811, Rondelet procède aux travaux de restauration et de ragrément. Mais à la longue, d'autres problèmes se manifestent qui font qu'aujourd'hui encore, le Panthéon est un édifice dangereux et dispendieux à entretenir. Les nombreuses chutes de pierre entraînent en 1989 la fermeture au public de l'édifice, et un examen scientifique approfondi de sa structure révèle la présence d'une quantité insoupçonnée de fer: le Panthéon est une véritable maçonnerie armée que d'aucuns, depuis, n'ont pas hésité à comparer à du béton armé avant la lettre. Il est vrai que le fer devient plus abordable au dernier quart du XVIII^e siècle, mais on reste surpris devant les quantités mises en œuvre par Soufflot. Il était en tout cas beaucoup moins bien protégé de la corrosion par l'humidité qu'à Saint-Paul, où Wren s'est montré un bien meilleur architecte que Soufflot à Sainte-Geneviève; c'est la corrosion de cette abondante armature métallique fichée dans la maçonnerie qui fait éclater les pierres.

Il est assez significatif d'observer qu'à la charnière entre le XVIII^e et le XIX^e siècle, avant le « temps des ingénieurs », s'achève symboliquement avec ce dôme en maçonnerie armée du Panthéon de Paris l'ère de la construction des grands dômes en maçonnerie et s'annonce celle de la construction des dômes à ossature métallique, où les ingénieurs vont intervenir pour une part déterminante dans la conception.

Le premier dôme métallique

Le tout premier dôme métallique se trouve également à Paris. Il s'agit de la coupole de la Halle au Blé érigée de 1809 à 1813, dernière réalisation majeure d'un élégant architecte du Siècle des Lumières, François-Joseph Bélanger. Les dimensions de cette coupole à ossature en arcs de fonte et cerces en fer rivalisent d'emblée avec celles des grands dômes en maçonnerie: le diamètre de la coupole est de 36 m (fig. 10). La question de la couverture de la cour intérieure de la Halle au Blé, dont la construction date de 1767, s'est déjà posée en 1782. Bélanger a voyagé en Angleterre et a pu y observer la place que commencent à prendre le fer et la fonte dans la construction des ponts et dans l'architecture. Il a proposé dès 1782 le projet révolutionnaire d'un

grand dôme en verre à ossature métallique. C'est celui d'un dôme vitré à ossature bois, plus économique, dont la construction est basée sur la technique des planches courtes inventée au XVI^e siècle par Philibert de l'Orme, qui a été réalisé par Jacques-Guillaume Legrand et Jacques Molinos. Mais cette structure brûle en 1803. Bélanger, grâce à l'appui de l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Louis Becquey, qui vient de réaliser (1802-1806) le pont d'Austerlitz en fonte, tient alors sa revanche. Pour la construction de la charpente métallique de la Halle au Blé, il collabore avec un ingénieur dénommé François Brunet, auquel on attribue le dimensionnement des éléments métalliques. L'historien de l'architecture Sigfried Giedion va jusqu'à affirmer que cette construction constitue l'une des premières réalisations où l'architecte et l'ingénieur ne sont plus la même personne. Si l'on sait peu de choses sur Brunet et son rôle exact, il y a cependant lieu de souligner qu'on ne dispose pas encore à l'époque de modèle de fonctionnement structural des arcs - et *a fortiori* des coupoles - permettant d'évaluer correctement les efforts dans les éléments en fer et en fonte de la Halle et que leur dimensionnement n'obéit donc sans doute pas à des règles rationnelles.

DÔMES ET COUPOLES BRUXELLOIS

Il n'existe pas dans le patrimoine architectural bruxellois, ni même belge d'ailleurs, de dômes en maçonnerie antérieurs à 1800 dont les dimensions puissent rivaliser avec celles des grandes structures dont il vient d'être question, qui n'ont pu être édifiées que dans des cités constituant des lieux de pouvoir temporel ou spirituel appelant la construction d'églises prestigieuses et imposantes. Il n'en demeure pas moins que ces constructions hors normes déterminent le style que les architectes appelés à travailler sur des constructions d'ampleur plus modeste se doivent d'imiter. Les croisées du transept de plusieurs églises baroques à Bruxelles sont couvertes par des coupes qui apparaissent comme des modèles réduits des dômes de Florence ou de Rome: il en est ainsi des coupes des églises Notre-Dame-aux-Riches-Claïres² (1665-1670) détruite par un incendie en 1989 et reconstruite en 1992, Notre-Dame du Bon-Secours³ (1664-1694) et Saints-Jean-et-Étienne-aux-Minimes (1700-1715). Leurs dimensions modestes laissent cependant penser qu'il ne s'agit pas là à proprement parler de dômes au sens structural du terme mais de coupes en stuc supportées par une charpente en bois.

Le dôme néoclassique hérité de Palladio et de Saint-Paul est probablement le mieux représenté à Bruxelles par la coupole qui couvre la croisée du transept de l'église Saint-Jacques sur Coudeberg⁴ (1776-1787) (fig. 11a et fig. 11b) et par la coupole de la rotonde du salon à l'italienne du château Schoonenberg, actuel Palais royal de Laeken, (1782-1784), seule partie du bâtiment ayant échappé aux flammes de l'incendie de 1890 (fig. 12). Des gravures anciennes ainsi que les dimensions respectables de ces coupes -16 m de diamètre pour la rotonde du palais-, peuvent laisser supposer qu'elles sont réalisées en maçonnerie et qu'il s'agit dès lors de vrais dômes au sens structural.

Le matériau de construction du XIX^e siècle est le fer, puis l'acier, et on a vu qu'en matière de dômes et coupes, le

siècle s'est inauguré avec la Halle au Blé à Paris. Les coupes les plus significatives du siècle à Bruxelles, et les plus connues de ses habitants, sont également à ossature métallique. Il y a tout d'abord l'ossature du dôme néo-byzantin de 22,5 m de diamètre, imitant stylistiquement celui de la cathédrale de Florence, de l'église royale Sainte-Marie⁵ (fig. 13). Une structure métallique pour ce dôme était prévue dès le projet initial de 1844, mais n'a été placée qu'à son achèvement en 1885. Autre coupole, sur un bâtiment civil cette fois: celle qui surmonte l'impressionnant Palais de Justice⁶ (1866-1883) (fig. 14). Si le Palais de Justice est une monumentale construction en maçonnerie de pierre, dont des parties sont fortement renforcées d'armatures à l'instar du Panthéon de Paris, le dôme de 17,2 m de diamètre est constitué d'une ossature à fermes radiales en treillis en X. Sa structure actuelle, reconstruite après l'incendie de 1944, n'est pas très différente de celle d'origine. Ces deux dômes bien connus sont structurellement des faux: ils donnent l'impression de coupes construites dans la lignée d'une certaine tradition néo-éclectique, mais n'en sont pas. Simplement recouvertes de feuilles de plomb ou de cuivre, les structures métalliques en arcs de ces coupes, simples artifices supports, sont cachées à l'œil; il est fort heureux qu'il en soit ainsi car, outre leur anachronisme, elles ne présentent aucune prouesse constructive, même à l'époque de leur édification. Tel n'est pas le cas en revanche de la coupole du jardin d'hiver des serres royales de Laeken⁷, terminées en 1876, déterminant au sol un diamètre de 60 m, et qui s'inscrit beaucoup plus directement dans la lignée de la coupole de la Halle au Blé. La structure de cette immense verrière, assez complexe, élégante et audacieuse repose par l'intermédiaire de 36 arcs en fer sur 36 fines colonnettes.

Le matériau nouveau à l'orée du XX^e siècle est le béton armé et Bruxelles joue un rôle important dans sa diffusion au niveau international par deux circonstances. Tout d'abord par le fait que l'un des pionniers de la nouvelle technique, le Français François Hennebique, a établi à Bruxelles, de 1886

à 1896, le centre de ses affaires, qui consiste à proposer et calculer des projets en béton armé. La position de Hennebique sera dominante jusqu'à la Première Guerre mondiale. Ensuite, parce qu'un des tout premiers théoriciens du béton armé est l'ingénieur belge des Ponts et Chaussées, Paul Christophe, dont le livre fouillé *Le béton armé et ses applications*, publié en 1902, va faire autorité dans le domaine, même à l'étranger, pendant une quinzaine d'années. Il n'est donc pas surprenant de voir reproduite dans le livre de Paul Christophe l'une des toutes premières coupes en béton armé étudiées par le bureau Hennebique: un petit dôme de 7,5 m d'ouverture, fine calotte reposant sur de fins arcs, recouvrant la salle des guichets de l'ancienne Banque Brunner⁸, construit vers 1900.

Mais l'une des grandes heures de la construction en béton armé est l'épopée des voiles minces qui exploitent spectaculairement les possibilités techniques et plastiques du matériau. Les premiers voiles minces en béton apparaissent dans les années vingt, et l'apogée de ce type de structures se situe sans doute vers la fin des années cinquante. Pour notre propos, il est intéressant de souligner que l'histoire des voiles minces débute justement par la construction de coupes: le tout premier dôme en voile mince est la calotte sphérique de 25 m de diamètre et de seulement 6 cm d'épaisseur construite à Léna, en Thuringe, en 1925, comme écran de projection en voûte céleste -toute la dimension symbolique des dômes...- pour le planétarium Zeiss. Des planétariums de ce type vont être construits dans plusieurs villes dans les années suivantes, et en particulier à Bruxelles: la coque de l'Alberteum⁹ (fig. 15) construite en 1935 fait 23,5 m de diamètre et 5 cm d'épaisseur. Dans un genre un peu différent, la belle coupole très surbaissée de 23 m de diamètre (fig. 14) réalisée en béton de pavés de verre et qui couvre la rotonde de la galerie Ravenstein¹⁰ (fig. 16), achevée en 1958, constitue très probablement la dernière coupole à Bruxelles s'inscrivant dans la tradition millénaire de l'art de construire des dômes et coupes.

Fig. 11a

Coupe longitudinale de l'église Saint-Jacques sur Coudenberg
 (in GOETGHEBUER, P.J.,
*Choix des monuments,
 édifices et maisons les plus
 remarquables du Royaume des
 Pays-Bas, Gand, 1827 ©KBR).*

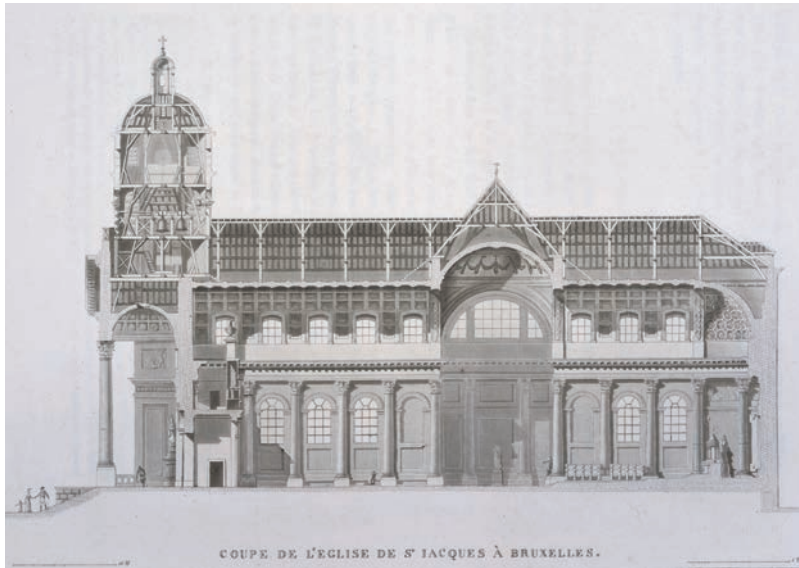


Fig. 11b

Vue de l'intérieur de la coupole
 à l'église Saint-Jacques sur
 Coudenberg (A. de Ville de
 Goyet, 2007 ©MRBC).

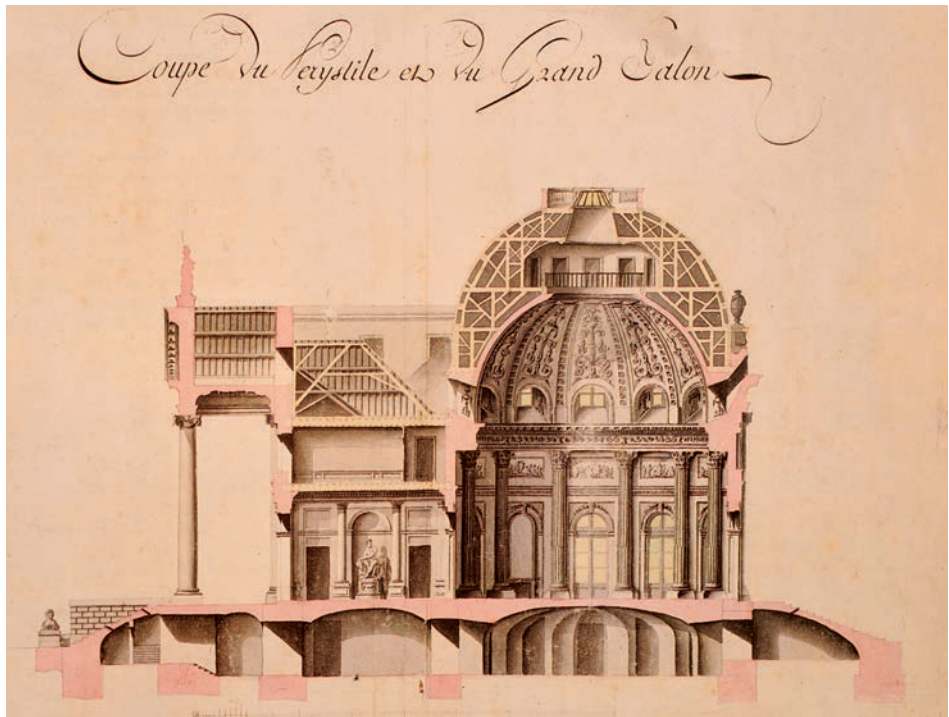


Fig. 12

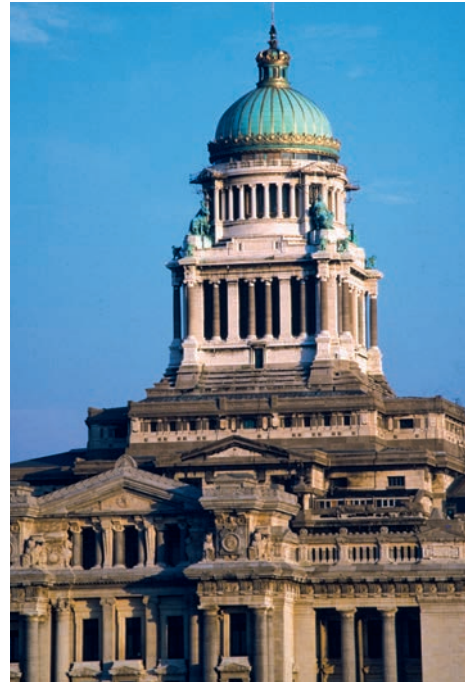
Coupe transversale au niveau
 de la rotonde du Château de
 Laeken (© Albertina, Vienne).

Fig. 13

L'église royale Sainte-Marie
(A. de Ville de Goyet, 2007
©MRBC).

**Fig. 14**

La coupole du Palais de
Justice (Chr. Bastin & J. Evrard
©MRBC).

**Fig. 15**

La coque de l'Alberteum,
construite en 1935, faisait
23,5 m de diamètre et 5 cm
d'épaisseur. Le Planetarium
actuel en est une copie (A. de
Ville de Goyet, 2012 © MRBC).

**Fig. 16**

Coupole de 23 m de diamètre
réalisée en béton de pavés de
verre et couvrant la rotonde
de la galerie Ravenstein (A. de
Ville de Goyet, 2007 © MRBC).



GLOSSAIRE

Chaînage circconférentiel : la fissuration verticale induite dans les parties basses des dômes en maçonnerie libère des efforts de traction qu'on a souvent cherché à équilibrer en les faisant reprendre par des ceintures horizontales de renforcement. Celles-ci peuvent revêtir des dispositions variées mais, dès la Renaissance, elles comportent en général des éléments métalliques. Elles ne sont pas visibles car insérées dans l'épaisseur du dôme mais, pour utiliser une image, elles agissent comme les cerces d'un tonneau.

Construction sur cintre : un cintre est une structure en bois provisoire destinée à supporter une voûte, un arc ou une coupole tant que la construction est incapable de supporter son propre poids. Ainsi, pour un arc en maçonnerie, le cintre est nécessaire tant que la clé de voûte n'a pas été placée ; pour une voûte en béton, le cintre doit rester en place jusqu'à ce que le béton ait acquis une résistance suffisante. Le cintre donne aussi sa forme définitive à l'ouvrage.

BIBLIOGRAPHIE

ADDIS, B., *Building: 3000 years of design, engineering and construction*, Phaidon, Londres, 2007.

CAMPBELL, J. W. P., *Building St Paul's*, Thames & Hudson, Londres, 2007.

FANELLI, G., FANELLI, M., *La coupole de Brunelleschi. Histoire et avenir d'une grande construction*, Mandragora, Florence, 2004.

GALLUZZI, P., *Les ingénieurs de la Renaissance de Brunelleschi à Léonard de Vinci*, Giunti, Florence, 1995.

HEINLE, E., SCHLAICH, J., *Kuppeln aller Zeiten - aller Kulturen*. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996.

PICON, A. *Architectes et ingénieurs au Siècle des Lumières*, Parenthèses, Marseille, 1988.

NOTES

1. Les analyses les plus fondamentales concernant la stabilité des grands dômes en maçonnerie évoqués dans cet article sont dues à Roland Mainstone, qui leur a consacré de nombreuses études archéologiques et structurales (e.g. MAINSTONE, R. J., *Structure in architecture. History, design and innovation*, Ashgate, Aldershot, 1999), et à Jacques Heyman, qui a formalisé et brillamment illustré l'application de la théorie de l'analyse limite aux constructions en maçonnerie (e.g. HEYMAN, J., *Arches, vaults and buttresses*, Ashgate, Aldershot, 1996).

2. Attribuée au sculpteur-architecte Luc Fayd'herbe de Malines.

3. Attribuée à l'ébéniste-architecte Jean Cortvrindt.

4. Les façades néoclassiques de la place Royale sont dues aux architectes français Jean-Benoît-Vincent Barré et Gilles-Barnabé Guimard, mais l'intérieur de Saint-Jacques a été réalisé sous la direction de Louis Montoyer en 1785-1786.

5. Le projet de l'église royale-Sainte-Marie est dû à l'architecte Henri Van Overstraeten; après son décès, les travaux sont repris par l'architecte Gustave Hansotte.

6. Le nom de l'architecte du Palais de Justice, Joseph Poelaert, est bien connu. Il ne verra d'ailleurs pas son œuvre terminée, mais la coupole et tous les renforcements métalliques ont été étudiés par l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et président de la Commission royale des Monuments et des Sites, François Wellens.

7. Architecte Alphonse Balat.

8. Rue de la Loi, 78. Léon Govaerts, architecte

9. Le dôme originel, Charles Van Nueten et Maurice Keym architectes, a été démoli en 1968. La coupole actuelle (25 m de diamètre, 7 cm d'épaisseur) date de 1976.

10. Architectes Alexis et Philippe Dumont.

The Art of Building before the age of the engineers. History of some domes

From antiquity until the late eighteenth century, large masonry domes have always presented challenges to their builders. On account of their large span, the construction of these exceptional structures brings to the fore the problems of the use of materials, stability and site operations. The history of the construction and an analysis of the performance of these large domes provide an interesting interpretation of the Art of Building at the highest level before the emergence of the modern engineer in the early nineteenth century. The milestones of this history are the construction of the domes of the Roman Pantheon, the cathedral of Florence, St. Peter's Basilica in Rome, St. Paul's Cathedral in London and the French Panthéon in Paris. These churches are landmark buildings not only from the builders' standpoint, but also in terms of architectural history, as they gave rise to infinite variations on a smaller or even symbolic scale. Many traces of them are to be found in the heritage of Brussels. Finally, it was once again the shape of the dome or cupola, at the Halle au Blé in Paris, that heralded the era of large spans of architectural metal and glass in the nineteenth century, such as in the greenhouses of the winter garden at the Royal Residence of Laeken.

COMITÉ DE RÉDACTION

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

COORDINATION DE PRODUCTION

Koen de Visscher

RÉDACTION

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

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

TRADUCTION

Gitracom

RELECTURE

Elisabeth Cluzel et le comité de rédaction.

GRAPHISME

supersimple.be

IMPRESSION

Dereume Printing

REMERCIEMENTS

Philippe Charlier, Julie Coppens, Marcel Vanhulst

ÉDITEUR RESPONSABLE

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

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

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

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

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

IMAGE DE COUVERTURE

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

LISTE DES ABRÉVIATIONS

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

ISNN

2034-578X

DÉPÔT LÉGAL

D/2012/6860/12

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