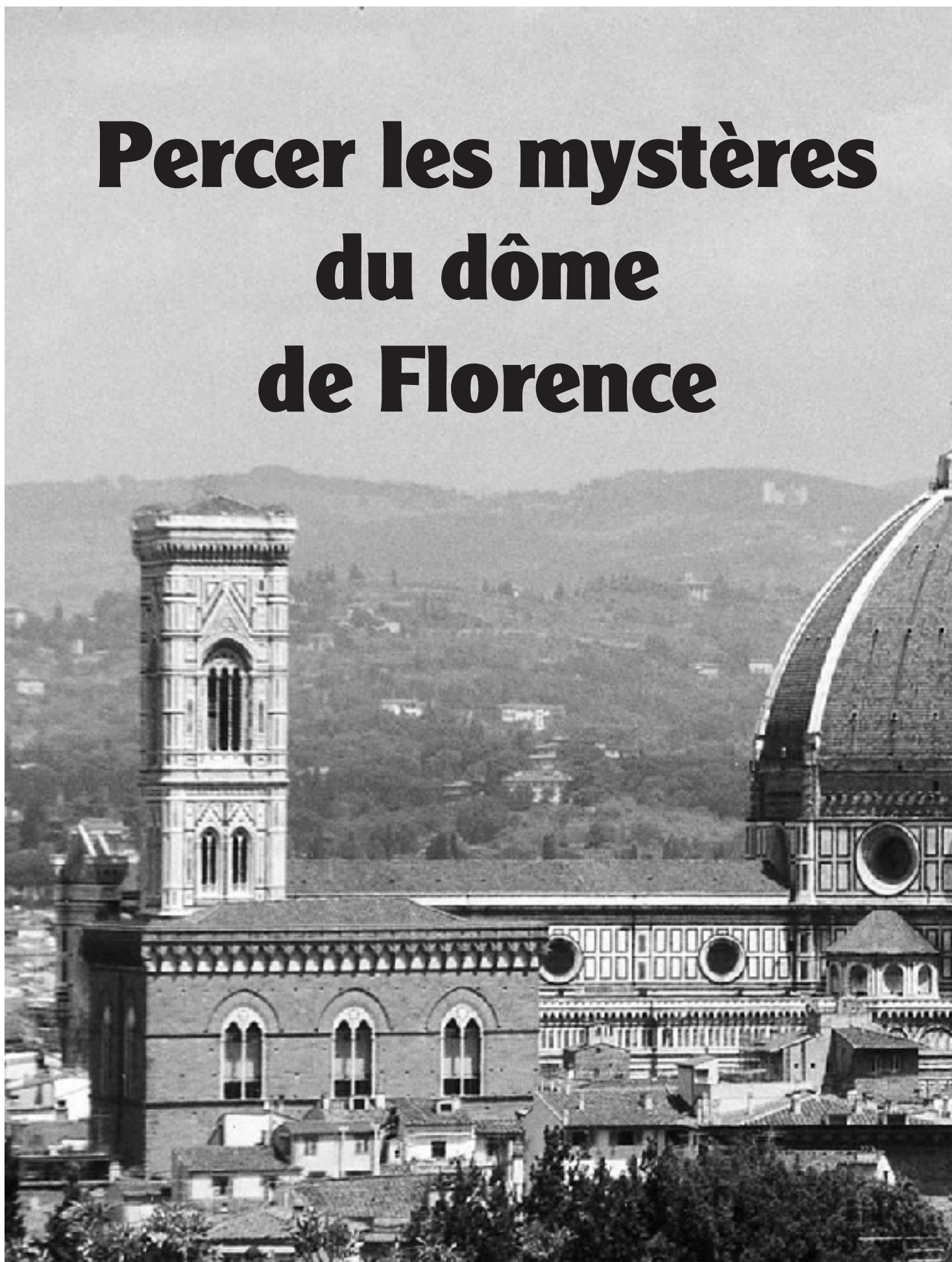


# Percer les mystères du dôme de Florence





« Pour le sage, au contraire, il n'est rien d'invisible, sinon ce qui n'est pas, sinon la pure absence. »

Filippo Brunelleschi,  
répondant à l'un de ses détracteurs.

### KAREL VEREYCKEN

**T**out le monde pense connaître l'énorme dôme à pans coupés sur plan octogonal de Santa Maria del Fiore, dominant la belle ville de Florence de ses quelque 112 m, car chacun l'a vu, au moins en photo.

Les deux escaliers de 463 marches qui serpentent entre les deux calottes conduisent à la base d'un lanternon qui se trouve à la hauteur équivalente d'un immeuble de quarante étages. Achevé en 1436 après seize ans et deux semaines de travail acharné, nécessitant près de 4 millions de briques et pesant environ 37 000 t, le dôme est devenu non seulement l'emblème de Florence mais le symbole même de la Renaissance. Avec ses 42,2 m de diamètre, sa largeur est quasiment l'équivalent de celui de la coupole sphérique du Panthéon de Rome (43,4 m) et son diamètre ne sera que légèrement dépassé en 1765 par la Halle aux Blés de Paris (44 m). Ni la basilique Saint-Pierre de Rome (42 m), ni le dôme des Invalides (27,5 m) ni la cathédrale Saint-Paul de Londres (30,7 m), ni même la coupole en métal du Capitole de Washington DC ne le dépassent.

Sa réalisation, tenue pour impossible à son époque, est associée au nom d'un seul homme – Filippo Brunelleschi (1377-1446) – à qui l'on attribue aussi l'invention de la perspective linéaire. L'architecte Léon Battista Alberti (1404-1472), dans le prologue de son traité sur la perspective *De Pictura* (1435), disait de lui : « *Quel homme, si dur ou si jaloux, ne louerait l'architecte Filippo en voyant cette énorme construction se dressant jusqu'au ciel, assez vaste pour couvrir de son ombre toute la population de Toscane, et exécutée sans l'aide de poutrages ni de renfort de supports de bois.* »

Comme nous allons le voir ici, ce grand chantier, défiant toutes les

connaissances humaines de l'époque, fut la véritable locomotive d'une révolution dans les sciences et les techniques qui entraînera, pendant des siècles, une vague d'optimisme au grand bénéfice de l'ensemble de l'humanité. Avec le *duomo*, Brunelleschi tracera de nouveaux horizons, bien au-delà de la simple construction d'un édifice.

### Genèse du projet

Il fallait enfin achever cet immense chantier sur l'emplacement de l'ancienne église Santa Reparata, commencé en 1296 par Arnolfo di Cambio et agrandi en 1351 par Francesco Talenti. A Florence, tout le monde connaissait bien la forme finale du « dôme à pans coupés sur plan octogonal » à réaliser. Depuis 1367, une maquette du projet était exposée au public dans une des ailes de la Basilique en voie d'agrandissement. Déjà à cette époque, un concours avait opposé deux groupes d'architectes. Le premier, dirigé par Lapo Ghini, plaïda en faveur d'un concept architectural proche du style gothique traditionnel, combinant des murs assez minces avec un ensemble d'énormes contreforts et arcs-boutants semblables à ceux des cathédrales, destinés à soutenir la coupole. L'autre groupe fut dirigé par l'architecte Neri di Fioravanti, celui qui réalisa la voûte (large de 18 m) de la maison d'arrêt Bargello et le Ponto Vecchio. Il exigea, quant à lui, une solution « à l'antique ». Neri, comme beaucoup d'autres en Italie à l'époque, considérait que les arcs-boutants non seulement n'étaient pas très esthétiques mais appartenaient au patrimoine culturel des ennemis traditionnels des Florentins : les Allemands, les Français, les Milanais et autres « barbares » (« Goths »).

Selon Neri, on pouvait très bien faire l'économie de ces contreforts et arcs-boutants en incorporant des



↗ tirants, en pierre et en bois, autour de la circonférence, semblables à la façon dont les cerceaux cerclent les douves d'un tonneau. Ce concept est intéressant mais, comme nous allons le voir, insuffisant. L'emploi du métal en architecture était encore à un stade assez expérimental. Toutefois, lors de la reconstruction du cœur demi-circulaire de la cathédrale de Beauvais, après son effondrement en 1284, on relia déjà les arcs-boutants entre eux par des tirants en fer afin de renforcer la cohésion de la structure.

Pour la coupole, Neri prévoyait l'utilisation, très rare mais pas exceptionnelle à l'époque, d'une double calotte. Cette technique d'origine perse est devenue caractéristique des mosquées et des mausolées islamiques, comme le Mausolée à base octogonale de Öljeitü (26 m de diamètre) construit en 1309 à Sultanyia (Azerbaïdjan). Une calotte interne porte l'édifice avec sa force structurelle, tandis qu'une calotte externe, en plus d'une protection contre les éléments, permet d'ajouter du volume supplémentaire.

En s'éloignant fortement de la conception du Panthéon de Rome où le dôme sphérique est coïncé dans une masse de béton, Neri avait également l'intention d'élever les courbes des pans à élever sous forme

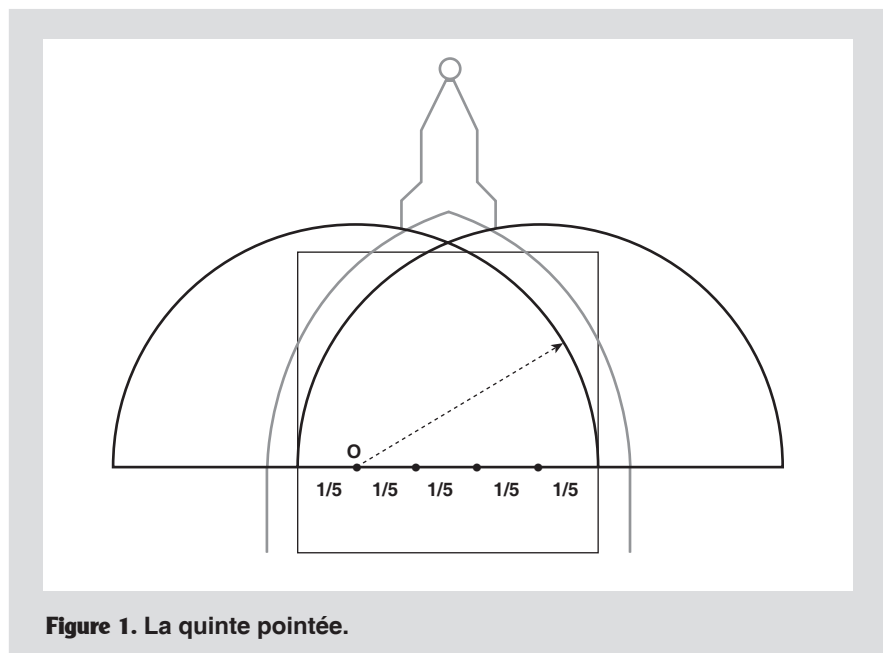


Figure 1. La quinte pointée.

d'arcs brisés gothiques, connus en Italie sous le nom de « *quinto acuto* » (quinte pointée). Il s'agissait en fait de diviser le diamètre de l'octogone en cinq parties égales, les  $4/5^{\text{ème}}$  constituant le rayon de la courbe du dôme (figure 1). Après moult débats, le projet de Neri l'emporta et fut dans la foulée approuvé par référendum populaire à Florence. Toutefois, Neri mourut sans laisser aucune instruction précise.

A partir de 1415, tout fut enfin

prêt. Avec le tambour nouvellement construit, l'édifice atteignait déjà une hauteur impressionnante de 52 m mais exhibant un trou béant large de plus de 42 m. L'heure de vérité avait sonné. En 1418, après quarante-huit ans d'hésitations, les maîtres d'œuvres du Dôme de Florence organisèrent un nouveau concours pour décider du projet et c'est à ce moment que Filippo Brunelleschi entra en scène.

Antonio di Tuccio Manetti (1423-1497), auteur de *La vie de Filippo Brunelleschi* et qui connut le maître de son vivant, raconte : « *D'autant plus que les maîtres d'œuvres s'inquiétaient déjà de la difficulté d'avoir à construire une voûte si large et si haute : étant donné la hauteur et la largeur, donc le poids, les étaitements et soutiens, arcs ou autres armatures, devaient partir de terre, de sorte que, non seulement la dépense leur paraissait effrayante, mais la réalisation à vrai dire absolument impossible.* »

A ceux qui évoquèrent cette impossibilité, Brunelleschi répondit que le dôme était un édifice sacré et que « *Dieu, à qui rien n'est impossible, ne nous abandonnerait pas.* » Pour lancer le projet, il suggérait aux maîtres d'œuvre, les Fabriciens, d'organiser un colloque international et de réunir tous les architectes, maîtres maçons et ingénieurs, « *autant qu'on en trouverait dans la chrétienté.* »

Cette réunion eut lieu et voici comment Antonio di Tuccio Manetti la relate : « *Des paroles de Filippo,*

## Encadré 1 - Proportions musicales et architecturales

Le 25 mars 1436, un motet à quatre voix intitulé le *Nuper Rosarum Flores* fut chanté pour la consécration du dôme de Florence. Ce motet, spécialement composé par le grand Guillaume Dufay pour cette occasion, affirme : « *Naguère des guirlandes de roses, par la grâce pontificale et en dépit d'un hiver sauvage, te furent offertes, Vierge céleste, comme ornement perpétuel, avec un temple de grande ingénuité, à toi dédié avec pitié et sainteté.* »

Guillaume Dufay est sans doute né le 5 août 1397 à Beersel près de Bruxelles, sinon à Cambrai où il mourra en 1474. De 1428 à 1437, il est attaché à la chapelle pontificale, à Rome, Florence et Bologne. Il donna un nouveau souffle à une technique ancienne : le motet isorythmique. Selon David Fallows, le *Nuper rosarum Flores* est construit sur deux voix inférieures exposées quatre fois à des vitesses différentes et selon des longueurs proportionnelles – 6:4:2:3 –, ce qui correspond aux proportions de la nef, de la croisée, de l'abside et de la hauteur de la coupole de la cathédrale. Le fait que ces deux voix utilisent la même mélodie – l'Introït pour la dédicace d'une église – à deux niveaux de tonalité et avec des rythmes s'interpénétrant, symbolise l'exploit architectural de Brunelleschi : une calotte intérieure encastrée sur une calotte supérieure. Ainsi, de la même façon que nous sommes séduits par la beauté des formes extérieures du dôme, l'effet musical du motet parvient à son effet musical maximum dans les lignes des voies supérieures.

## Encadré 2 - Brunelleschi et la Renaissance

Brunelleschi fut le fils d'un notaire de Florence. Doué dès son enfance pour le dessin, son père lui assura une carrière d'orfèvre (*orafo*). Passionné d'horlogerie et de machines, Brunelleschi eut la chance d'être initié à Euclide par Paolo Toscanelli del Pozzo (1397-1482), avec lequel il entretenait une amitié pendant toute sa vie adulte.

Toscanelli fut sans doute le plus grand scientifique polyvalent de son temps, menant des recherches dans tous les domaines importants : mathématiques, géométrie, perspective, cosmologie, médecine, astronomie et surtout la géographie appliquée à la cartographie. Il écrivit un traité sur la perspective en 1420 intitulé *Della Prospettiva*, malheureusement perdu, probablement avec l'aide de Brunelleschi qui, selon Manetti, faisait ses fameuses expériences à la même époque. Il suivit avec Nicolas de Cues les cours du mathématicien Proscimico del Beldomandi à Padoue. Avant publication, le Cusain lui envoya le manuscrit de sa première œuvre mathématique intitulée les *Transmutations géométriques* (1445), puis ses *Compléments arithmétiques* (1450). Toscanelli fut souvent appelé « Paolo le médecin », parce qu'il couronna ses études avec un doctorat de médecine tandis que Nicolas obtint le titre de *doctor decretorum*. Toscanelli devint ensuite conservateur de la bibliothèque de Niccolò Niccoli à Florence. Ce dernier fut l'un des plus ardents collectionneurs de manuscrits de la Renaissance italienne, dont la collection sera le fonds de départ de la fameuse bibliothèque Laurentienne pour devenir ensuite le cœur de la bibliothèque Vaticane. Toscanelli sera aussi un ami direct et l'inspirateur du jeune Léonard de Vinci, et c'est à Toscanelli que son ami Nicolas de Cues dicta ses dernières volontés sur son lit de mort.

Toscanelli, le Cusain, Niccoli, Cesarini et sans doute Brunelleschi faisaient partie du groupe d'action politique et de réexon qu'animait le général de l'ordre des Camaldules, Ambrogio Traversari, avec l'appui bienveillant de



Côme de Medicis, grand patron de l'industrie lainière.

C'est Traversari, protecteur du peintre Piero della Francesca, qui recruta le Cusain pour organiser avec lui le grand concile œcuménique, qui aura finalement lieu à Florence en 1438 pour tenter de sceller la réunification des églises d'Orient et d'Occident. Ils imposeront les plus grands papes humanistes de la Renaissance : Martin V, Eugène IV, Nicolas V et Pie II.

Réunir Orient et Occident sous un dôme unique, grand et beau, capable d'englober toutes les coupoles de la chrétienté, était un puissant symbole et l'on mesure derrière ce projet tout l'engagement actif d'une pléiade d'humanistes. On y réfléchit sur la quadrature du cercle, on apprend

le grec et l'hébreu pour percer les secrets des écritures, on traduit Archimède, Végèce et Vitruve pour inventer des machines plus performantes, on démarre l'industrie, on produit du papier pour lancer l'imprimerie, on fonde des hôpitaux et des écoles. Bref, on ne fait pas que parler de Renaissance, on la fait.

Cependant, cet engagement n'est pas sans risque. Exploitant politiquement la défaite militaire de Florence contre Lucca de 1433, la famille oligarchique des Albizzi jeta tout le blâme sur Côme et le fit jeter en prison, le forçant même à l'exil à Venise. Ayant perdu son protecteur, Filippo Brunelleschi fut arrêté à son tour sous prétexte de ne pas être à jour avec sa cotisation de membre de la guilde du bâtiment, chose plutôt habituelle à l'époque. Quinze jours plus tard, les Albizzi furent écartés, Filippo relâché et Côme de retour à Florence. Martin V et Eugène IV, qui ouvrit la cathédrale après cent quarante ans de construction, intervinrent personnellement à plusieurs reprises pour protéger et promouvoir l'architecte génial Brunelleschi. Celui-ci, mort en 1446, ne verra ni la lanterne qu'il avait conçue, terminée en 1471, ni la sphère en bronze de 2,5 m, fabriquée et posée par l'atelier d'où sortait Léonard de Vinci, celui d'Andrea del Verrocchio.

*les Fabriens tiraient avec accord le verdict qu'un édifice aussi grand et d'une telle nature ne pouvait être achevé et que ç'avait été une naïveté, de la part des architectes du passé et de ceux qui l'avaient projeté, de le croire. Quand Filippo disait, à l'encontre de cette opinion fautive, qu'on pouvait le faire, ils répondaient tous ensemble : "Comment fera-t-on les cintres ?", mais lui revenait toujours à l'idée qu'on voûterait sans cintre. Comme ils discutaient la-dessus depuis plusieurs jours, à deux reprises*

*les Fabriens le firent jeter dehors par des gens à eux et de l'Art de la Laine, comme s'il résonnait stupidement et ne disait que des paroles ridicules ; au point qu'il lui arriva souvent de raconter que dans ce laps de temps, il n'osait pas se promener dans Florence, ayant l'impression qu'on disait derrière lui : "Regarde ce fou qui a de telles prétentions". »*

Dans une autre réunion de travail, et avant d'être nommé « *capomaestro* » (architecte en chef) du chantier, on lui demanda d'indiquer

sa méthode et les moyens d'exécution qu'il envisageait pour relever ce défi. Craignant qu'on lui vole le projet, Brunelleschi se contenta de leur présenter un œuf en disant : « *Celui qui le fera tenir debout sera digne de faire la coupole.* » Ainsi, bien avant Colomb et après que chacun ait tenté sans succès, Brunelleschi écrasa le bout de l'œuf sur une table en marbre. Chacun s'écria qu'il en aurait fait autant « *s'il avait su* », et Brunelleschi répondit en riant qu'ils sauraient également faire la coupole

↳ s'il leur montrait son modèle.

En examinant aujourd'hui toutes les solutions créatrices que l'infatigable Brunelleschi aligna pour résoudre les problèmes scientifiques dans les domaines de la physique, de la géométrie, des machines et des matériaux, sans parler des problèmes politiques, financiers ou de la formation permanente d'une main-d'œuvre impliquée dans l'élaboration de technologies révolutionnaires, on doit mesurer la part de courage et de détermination sans laquelle les meilleures idées ne restent que rêveries.

Passionné par le sujet depuis sa tendre enfance, Brunelleschi va imposer des solutions longuement réfléchies. Etant donné qu'excepté un poème, aucun écrit de Brunelleschi ne nous est parvenu, le procédé exact et surtout sa mise en œuvre resteront un sujet éternel de spéculation. Bien que notre inventeur se battait pour breveter les nouvelles inventions, nous savons que, craignant de se voir dérober sa méthode, il ne communiquait que ses chiffres et de façon codée. Ce qui reste à lire est le dôme lui-même, et le spectateur se retrouve un peu comme celui du visiteur de la Cathédrale de Chartres devant « l'Âne qui vieille », cette statue qui vous lance d'une façon provocante le défi suivant : le monument que tu contemples est comme une lyre, prête à vibrer sous tes doigts, mais sauras-tu en extraire la secrète harmonie, ou bien seras-tu comme moi, l'âne avec ses gros sabots qui, ayant trouvé une lyre, fut incapable d'en jouer...

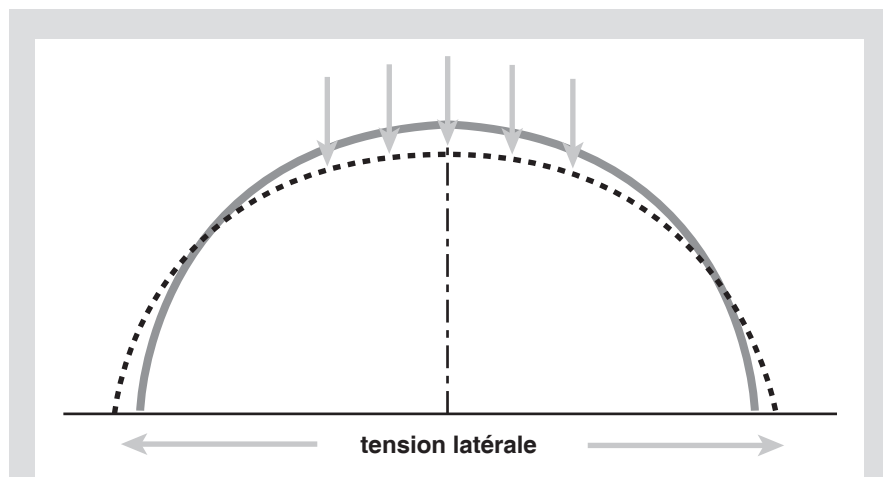


Figure 2. Les deux forces s'exerçant sur une coupole.

### Cintrage, ou construire sans bois

Pendant la construction d'un édifice ou d'une coupole, il faut affronter deux forces majeures : d'une part, la compression verticale qui provoque un écrasement et, d'autre part, la poussée latérale qui crée une rupture à l'écartement (figure 2).

La compression étant un problème relativement mineur, puisqu'il faut une hauteur importante avant que les pierres du bas ne s'écrasent sous la pression de celles du haut, c'est surtout la maîtrise de la pression latérale résultant des poussées verticales qui seront la première préoccupation de l'architecte.

En général, la construction d'arcs

s'opérait à partir d'une fausse charpente (supports temporaires) – le cintrage (figure 3) – permettant d'élever les voussoirs d'un arc de plein-cintre (roman) ou en arc brisé (gothique). Ce support n'était retiré qu'après le séchage du mortier et surtout après la pose de la clef de voûte, laquelle répartissait la poussée sur l'ensemble des voussoirs et la conduisait sur les colonnes qui soutiennent la voûte. Il est indiscutable que, pour des voûtes en berceau ou les nefs gothiques, un cintrage lourd s'avérait indispensable.

Cette technique n'est apparue que très tardivement dans des sociétés capables de produire un bois assez solide, soit au moins d'en disposer. Là où le bois faisait défaut ou était de mauvaise qualité, on tentait de construire sans cintrage. Auguste Choisi, dans son *Histoire de l'archi-*

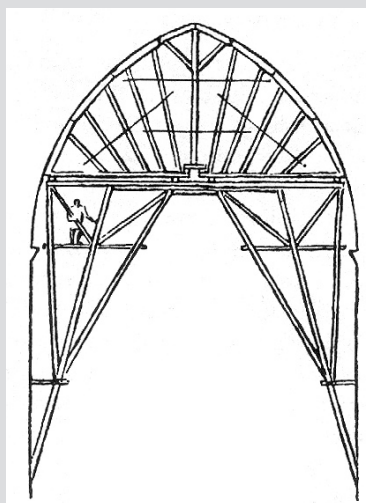
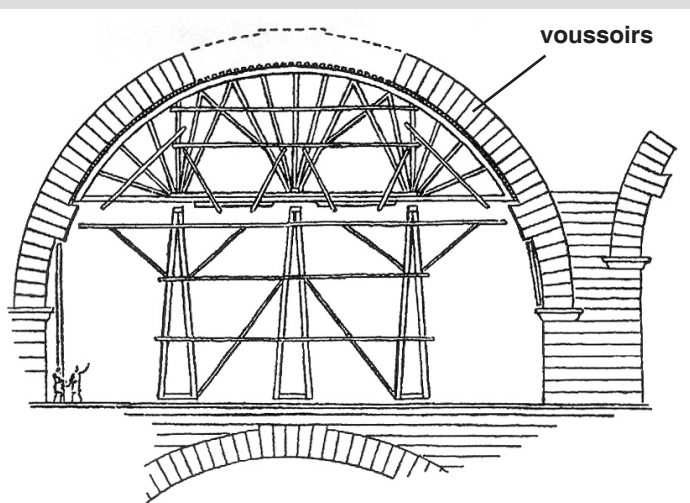


Figure 3. La construction d'arcs s'opérait à partir d'une fausse charpente – le cintrage. A gauche, arc de plein-cintre. A droite, arc brisé.



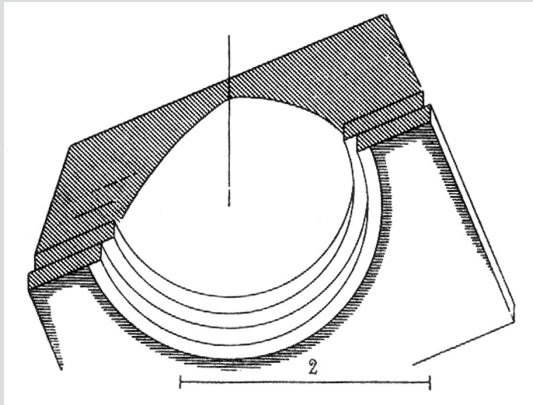


Figure 4. Dôme à Abydos en Egypte.

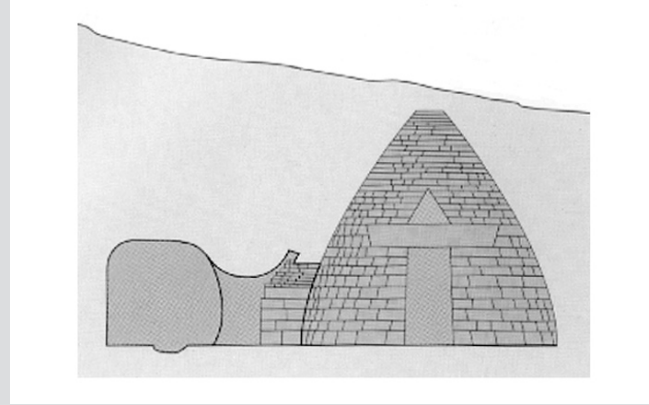


Figure 5. Le Trésor d'Atrée en Grèce.

ecture, signale déjà l'existence d'un dôme à Abydos en Egypte où, grâce au limon du Nil, l'emploi de briques crues (argile séchée) auraient permis l'élévation de dômes depuis les premières dynasties pharaoniques, 3000 avant J.-C. (figure 4) : « De tous les types de voûtes, celui qui se réalise le plus aisément sans cintres, est la voûte sphérique : le dôme est une des formes usuelles de la voûte égyptienne. Le profil est en ogive et la maçonnerie se compose d'assises planes et horizontales, véritables anneaux de briques dont le rayon va sans cesse décroissant. Chaque assise surplombe assez peu sur la précédente pour qu'un support auxiliaire soit superflu. Dès qu'une assise est achevée, elle constitue une couronne indéformable, prête à recevoir en encorbellement une assise nouvelle. »

Nous savons que cette science permettant de bâtir des dômes sans cintrage n'était pas exclusive à l'Egypte car, en remplaçant les briques d'Abydos par des pierres et en suivant une surface continue, la Grèce mycénienne a pu construire des dômes en « ruches d'abeilles », également exécutés sans cintres, comme celui de la promenade dite « Trésor d'Atrée » dont le diamètre dépasse 14 m (figure 5).

Alberti, dans son traité sur l'architecture *De re aedificatoria* (écrit vers 1440, publié en 1452), affirme que « la voûte sphérique [coupole], unique parmi les voûtes, ne requiert pas de cintrage parce qu'elle n'est

pas composée d'arches mais d'anneaux superposés ».

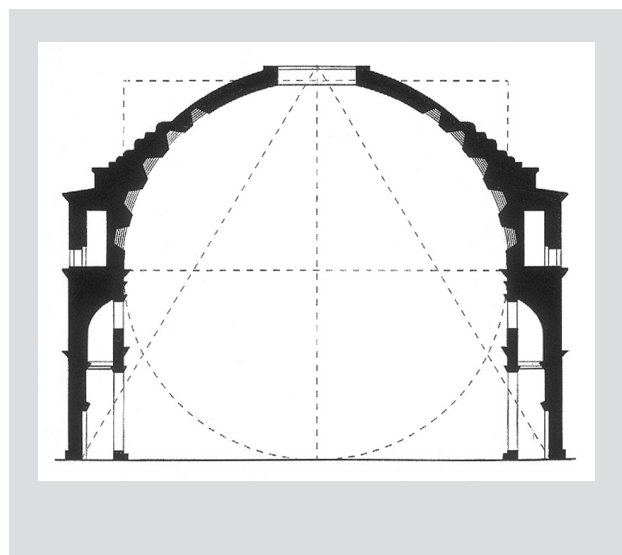
La plupart des historiens s'accordent aujourd'hui à dire que Brunelleschi, en compagnie de son ami le sculpteur Donatello, a étudié sur place la plupart des monuments que compte Rome. Pendant plusieurs années, bien avant le concours, les deux amis effectuèrent des relevés de tous les bâtiments et fouillèrent les sous-sols, à tel point qu'on les confondait avec des chasseurs de trésors. Là, ils purent analyser certaines prouesses et faiblesses de l'architecture romaine du II<sup>e</sup> siècle en étudiant le Panthéon (mis en chantier sous Hadrien en 121 après J.-C.), le temple de Minerve ou d'autres bâtiments semblables.

En ce qui concerne le dôme du Panthéon, la calotte intérieure est en réalité soutenue par un énorme contrefort en béton de puzzole (utilisant les cendres du Vésuve) de 5 000 t (figure 6). D'environ 44 m de

diamètre, cette calotte sphérique part de piliers en briques et fait appel à la fameuse « maçonnerie en blocage » (*opus caementicium*) qui sert de coffrage. Cette structure est ensuite couronnée par des couches circulaires horizontales de béton. Pour alléger le poids des matériaux, sans porter atteinte à leur rigidité, il fut superposé en alternance du béton à la brique, de la brique au tuf et à la toute légère pierre ponce. Les architectes, dont l'ingéniosité n'avait pas de limite, coulèrent dans le béton des amphores en argile vides pour éviter la surcharge de la voûte.

Par contre, il n'est pas sûr que nos deux artistes aient pu pénétrer dans le Domus Aurea (dôme doré) de Néron, l'emplacement où l'on trouva en 1506 le fameux *Laocoon*. Néron, après avoir laissé le feu dévaster Rome, fit construire en 64 après J.-C., dans sa villa, ce salon à coupole sphérique sur base octogonale d'un diamètre impressionnant de 14 m.

La construction sans bois dans un temps moins reculé est aussi documentée dans le livre de John Fitchen, *The construction of Gothic Cathedrals*, qui consacre tout un chapitre aux procédés de construction sans cintrage à l'époque des cathédrales (figure 7). Cependant, les constructeurs firent chaque fois appel à des artifices compliqués, intervenant sur le mur « de l'extérieur » sans faire appel à la « géométrie intérieure » de la structure des murs, comme le fera Brunelleschi.



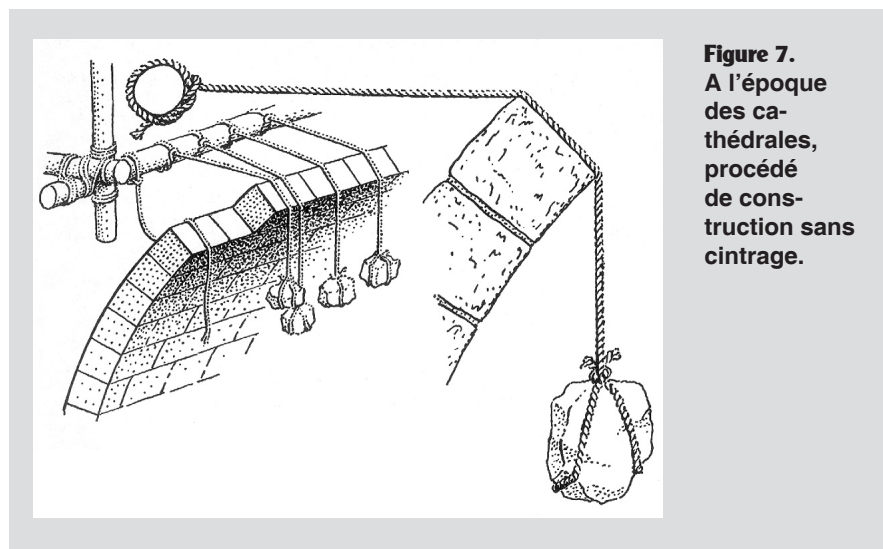


## Arcs, voûtes et coupoles

Avec ce survol des techniques de construction sans cintrage, il apparaît que la géométrie d'une surface sphérique semble posséder une des qualités fondamentales recherchées par Brunelleschi : l'auto-soutènement. Cette qualité de la courbe est facilement démontrable par une simple expérience. Tout le monde sait qu'une simple feuille de papier A4 de 60 g/m<sup>2</sup> ne possède pas la rigidité nécessaire pour soutenir, par exemple, un petit trousseau de clefs. Cependant, si je donne avec ma main une légère courbure à ma feuille, je peux soudainement doter la feuille de cette capacité portante inespérée. Cette force n'appartient pas à la nature de sa matière mais « émane » du pouvoir de sa structure géométrique.

Avant d'aller plus loin, il est essentiel de s'attarder quelque peu sur les arcs car certains observateurs prétendent que le dôme de Florence est un mélange de cette science de la construction sphérique « à l'antique » avec le savoir-faire du gothique. Rappelons-le, Neri avait spécifié que les pans devaient s'élever en « quinte pointée », comme les arcs brisés du gothique.

Toutefois, comme le note Fitchen (p. 80) : « Au fur et à mesure que le gothique devenait tardif, un grand nombre de voûtes devenaient de plus en plus pointues, entraînant des problèmes structurels. Dans un système d'arc libre, comme une voûte qui ne porte pas de surcharge et ne fait que se



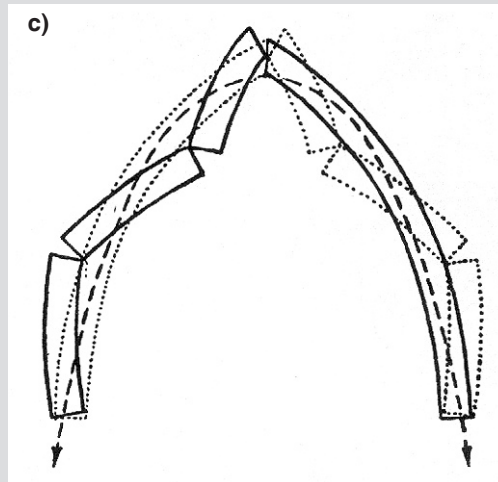
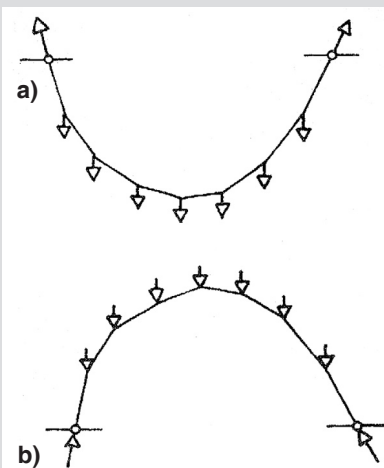
**Figure 7.**  
A l'époque des cathédrales, procédé de construction sans cintrage.

soutenir elle-même, la poussée prend la forme d'une chaînette inversée. Si l'on envisage une chaîne ou un câble librement suspendu entre deux points qui se trouvent à la même hauteur mais séparé par une distance plus petite que la longueur de la chaîne, chaque chaînon possède une unité de poids identique le long du tracé de la chaîne et est en tension avec ses voisins. Ensemble, ces chaînons traçent une ligne courbe dont l'axe est la ligne de la poussée. » (Figure 8.) On en trouve une illustration dans la *Théorie des voûtes* de Pierre Bouguer de 1734, ce qui montre que ce principe fut étudié à l'époque.

Voyons concrètement comment appliquer le principe de la chaînette à l'arc brisé. Si notre arc ne suit pas (aux extrados ou intrados) le tracé « invisible » de la chaînette, à moins d'être compensé par une rigidité supplémentaire du matériau,

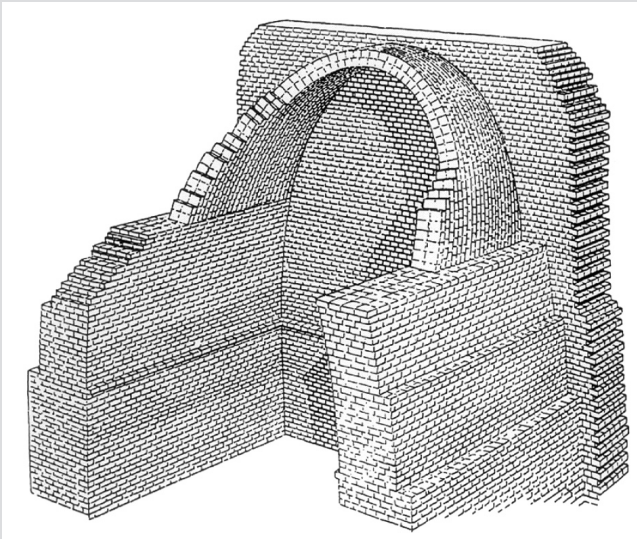
nous observerons que la poussée provoquera une rupture de l'arc et les voussoirs du bas, dépourvus de la flexibilité des chaînons, basculeront vers l'extérieur si l'arche est trop pointue, ou s'effondreront vers l'intérieur si l'arche est peu pointue. En étant plus solide avec moins de matériau, on comprend mieux pourquoi l'arc brisé constitua un tel progrès par rapport à l'arc de plein cintre. Bien que beaucoup moins stable d'un point de vue structurel, l'« arc chaînette » bénéficie d'une meilleure stabilité statique car harmonique avec le principe physique de la gravitation.

A partir de l'arc, on peut imaginer la voûte. Des voûtes en berceau ayant la forme d'une chaînette existent, comme l'arc de Ctésiphon du palais de Taq-i Kisra (figure 9), près de Bagdad en Iraq (531 après J.-C.), malheureusement endommagé par



**Figure 8.** a) Chaque chaînon possède une unité de poids identique le long de la chaînette. b) La poussée sera répartie uniformément sur un arc qui suit le tracé d'une chaînette inversée. c) Si l'arc ne suit pas le tracé « invisible » de la chaînette, à moins d'être compensé par une rigidité supplémentaire du matériau, la poussée provoquera une rupture de l'arc.

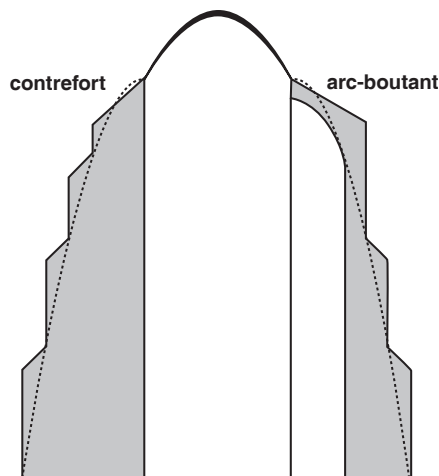




**Figure 9.** Des voûtes en berceau ayant la forme d'une chaînette existent, comme l'arc de Ctésiphon du palais de Taq-i Kisra, près de Bagdad en Iraq (531 après J.-C.).



**Figure 10.** Les greniers du Ramesseum en Egypte, près de Thèbes.



**Figure 11.** Dans l'architecture gothique, on utilise des contreforts et des arcs-boutants permettant d'évacuer la poussée s'exerçant sur les murs, contreforts eux-mêmes respectant de préférence les lignes de force d'une chaînette.

la crue du Tigre en 1985. Les lits de briques sont montés à la verticale, voire légèrement inclinés et reposant contre un mur qui absorbe la poussée. Il est construit sur le même principe que les voûtes en berceau, érigées sans cintrage, comme celles du grenier du Ramesseum (**figure 10**), près de Thèbes en Egypte (XIII<sup>e</sup> siècle avant J.-C.).

Comprenons bien qu'avec la géométrie de la chaînette utilisée de cette manière, en soumettant l'arc ou la voûte à une poussée qui dépasse son poids propre, il est indispensable d'avoir des renforts. C'est pour cette raison que, dans l'architecture gothique, on utilise des contreforts et des arcs-boutants permettant d'évacuer la poussée s'exerçant sur les murs, contreforts eux-mêmes inscrits de préférence dans les lignes de force d'une... chaînette (**figure 11**). Or, soulignons-le, la voûte construite en forme de chaînette inversée « *ne fait que se soutenir elle-même* »

En ce qui concerne le dôme de Brunelleschi, nous avons tenté de connaître les tracés décrits par les huit « *sproni* » (éperons en marbre blanc) qui suivent les courbes définies à l'extérieur par l'intersection des pans du dôme. En vain. En effet, les « experts » se disputent sur leur nature exacte – ellipse, tractrice, arc de cercle, chaînette, etc. – et il serait opportun de reprendre les mesures exactes de la construction afin d'avoir une bonne base d'étude.

Par contre, ce que nous savons, c'est l'accusation portée à l'époque contre Brunelleschi par l'un de ses détracteurs, Gherardo da Prato, selon laquelle il mettait en danger la construction par son ignorance et pour ne pas avoir respecté la « *quinte pointée* » comme stipulée dans le contrat. Da Prato exprima toute sa jalousie dans un poème adressé à Brunelleschi : « *O puits profond et noir de totale ignorance, misérable animal, et tellement risible qui veut que l'incertain par chacun soit visible, ton absurde alchimie est sans grande puissance [...].* » Brunelleschi, qui ne se laissa pas démonter, répondit également par un poème : « *Quand le ciel a donné de hautes espérances, ô toi dont l'animale apparence est visible, tout homme peut enfin laisser le corruptible, et disposer en tout d'une grande puissance. Qui mal en juge perd toute son assurance, car il n'affronte rien qui ne lui soit* »



terrible ; pour le sage, au contraire, il n'est rien d'invisible, sinon ce qui n'est pas, sinon la pure absence. L'artiste ne voit pas ces fadaïses d'un sot, mais il voit, s'il n'a pas de faux jugements, ce que cèle Nature sous son manteau. [...] »

Au-delà de l'anecdote, ce poème met bien en évidence la passion de Brunelleschi pour la découverte d'un principe universel invisible qu'il est en train d'arracher aux secrets de la Nature. Comme nous allons le démontrer par la suite, Brunelleschi et ses amis maîtrisaient le principe de la chaînette, dans le visible comme dans l'invisible.

A ce stade, Brunelleschi, chargé de couronner la coupole avec un lanteron pesant plusieurs tonnes, devait écarter les solutions suivantes :

- les arcs-boutants, il est vrai écartés d'emblée par contrat, posaient problèmes car la hauteur de 53 m à partir de laquelle il fallait amorcer le dôme rendait inenvisageable l'installation de lourds con-

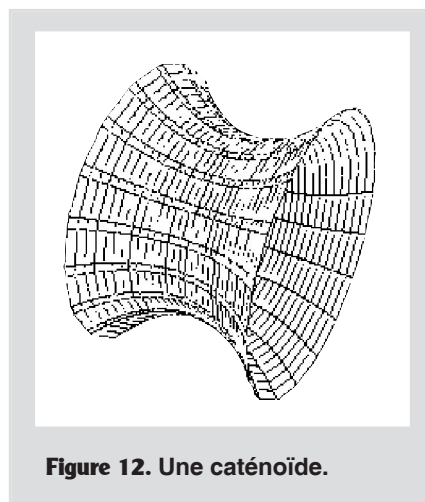


Figure 12. Une caténoïde.

trefforts devant partir du sol et pour lesquels, de toute façon, il n'y avait plus de place ;

- la sphère parfaite constructible sans cintrage par encorbellement de lits de briques aurait été incapable de soutenir le poids du lanteron ;
- un dôme formé par une chaînette en révolution – une caténoïde (figure 12) – aurait été lui aussi trop

faible pour soutenir la surcharge par sa faible capacité de portance.

Brunelleschi était donc obligé d'inventer la structure et la géométrie physique d'une surface autoportante, assez légère pour ne pas s'écrouler sous son propre poids, assez solide pour porter le lanteron et assez stable pour éviter tout besoin de cintrage.

## Les propriétés de la chaînette

Ce fut l'économiste américain Lyndon LaRouche qui, en 1988, fut le premier à identifier le principe physique de la chaînette comme étant l'élément fondamental dans la conception du dôme. Toutefois, pour comprendre comment Brunelleschi trouva cette solution, nous devons, probablement comme lui, retourner aux propriétés de la chaînette. C'est en jouant avec celle-ci que l'on peut, éventuellement, en découvrir les propriétés fondamentales.

### 1. Equilibre

Si l'on accroche une corde à deux clous le long d'un mur (figure 13), tout en veillant qu'elle puisse glisser sur les clous pour trouver son propre équilibre, on découvre que la forme de la chaînette dépend presque exclusivement de sa longueur. Allant à l'encontre de notre bon sens habituel, pour obtenir une chaînette avec un « ventre » plus grand, il faut une corde plus longue, et inversement, pour une chaînette plus proche de la ligne droite, il faut une corde plus courte. Pourquoi ?

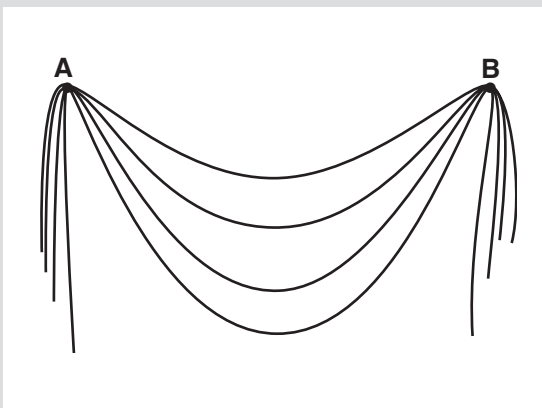


Figure 13. Si l'on accroche une corde à deux clous le long d'un mur, tout en veillant qu'elle puisse glisser sur les clous pour trouver son propre équilibre, on découvre que la forme de la chaînette dépend presque exclusivement de sa longueur.

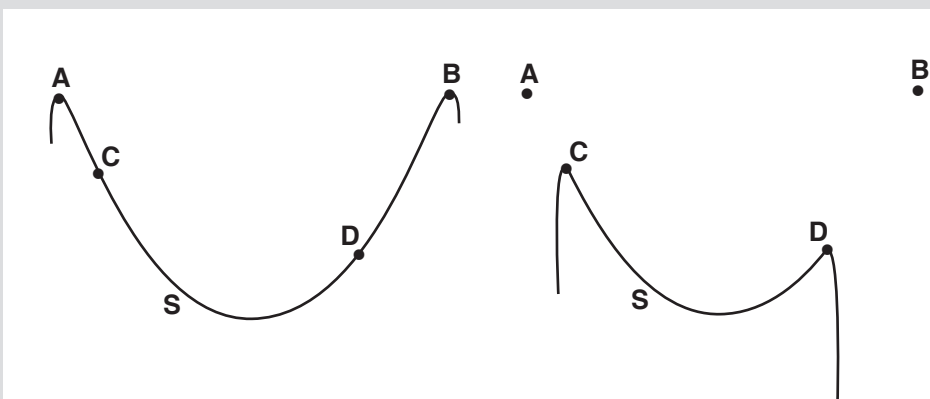


Figure 14. Si sur une chaînette ACDB, nous relâchons A et B, alors CD reste la même chaînette qu'auparavant. Inversement, selon le même principe, la chaînette (entre ses points de suspension) est définie par n'importe quelle de ses parties, peu importe la taille.

### Encadré 3 - Courbes de moindre action et surfaces optimales

La courbe de la chaînette, en opposition avec les courbes algébriques, appartient au domaine des courbes physiques et exprime le principe de moindre action. Selon ce principe baptisé « *principe d'économie naturelle* » par Pierre de Fermat (1601-1665), le chemin emprunté par la lumière pour se rendre d'un point donné à un autre est celui pour lequel le temps de parcours est minimum (« principe de Fermat »).

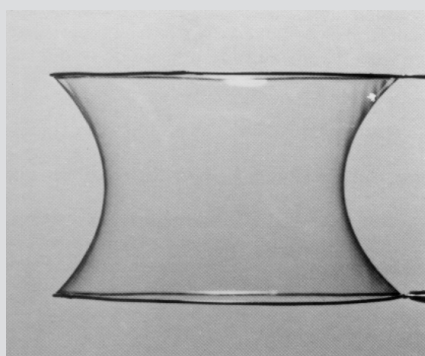
Leibniz (1646-1716), reprenant le principe du minimum-maximum que le Cusain avait déjà identifié en travaillant sur l'isopérimétrie, le formule ainsi dans *De la production originelle des choses prise à sa racine* : « Il y a toujours dans les choses, un principe de détermination, qu'il faut tirer de la considération d'un maximum et d'un minimum, à savoir que le maximum d'effet soit fourni avec un minimum de dépense. Dans le cas actuel, le temps et le lieu ou, en un mot, la réceptivité ou capacité du monde peut être considérée comme la dépense, c'est-à-dire le terrain sur lequel il s'agit de construire le plus avantageusement, et les variétés des formes dans le monde correspondent à la commodité de l'édifice, à la multitude et à la beauté des chambres. (...) Ainsi un liquide placé dans un autre, hétérogène, prend la forme qui a le maximum de capacité, à savoir la forme sphérique. Ainsi encore en mécanique ordinaire, de l'action de plusieurs graves concourant entre eux [une chaîne, NdA] résulte le mouvement par lequel en fin de compte se réalise la plus grande descente. Et de même que tous les possibles tendent d'un droit égal à exister, en proportion de leur réalité, ainsi tous les poids tendent aussi d'un droit égal à descendre, en proportion de leur gravité ; de même qu'ici se produit le mouvement dans lequel se remarque le maximum de



*descente de graves, de même le monde qui se réalise est celui qui réalise le maximum de possibles.* » En 1691, Leibniz note que Galilée confondait la chaînette avec la parabole, une différence fondamentale démontrée par Joachim Jungius (1585-1657). A partir des courbes de

moindre action, on peut aussi identifier des surfaces et des volumes de moindre action (« surfaces optimales »), très répandus dans la nature. L'expérience la plus simple permettant de les découvrir sont les bulles de savon. On y découvre la chaînette quand on trempe deux anneaux parallèles en fil

de fer dans de l'eau savonnée. Elles forment un « volume optimal » de type caténoïde (une chaînette en révolution). Quand on y trempe une armature reprenant la géométrie du dôme, des surfaces optimales apparaissent sur les pans, c'est-à-dire des surfaces de courbure « négative » (concaves), une géométrie semblable à celle du parapluie,



et identique au léger évasement des pans de la coupole, caché derrière les tuiles. On peut même faire apparaître la « double calotte » du dôme, qui se forme à l'instar du petit cube en eau savonneux qui se forme à l'intérieur d'une structure cubique. Tout ceci tend à nous convaincre que Brunelleschi a conçu l'ensemble de la coupole à partir d'un concept unique de volume optimal fondé sur le principe de moindre action, intensément débattus à l'époque dans son entourage immédiat (le Cusain, Toscanelli, etc.). Lyndon LaRouche,

remarque qu'« *il est assez troublant de découvrir que le principe de la chaînette fut employé aussi tôt (début du XV<sup>e</sup> siècle), pas seulement comme une forme mais comme un principe physique de courbure capable de résoudre le problème autrement insolvable de la construction.* » (« On The Issue of Mind Set », EIR, 3 mars, 2000.)

Parce que la chaînette va chercher son propre équilibre, c'est-à-dire que la somme du poids des parties extérieures va s'égaliser avec le poids de la partie de la chaînette entre les deux clous.

#### 2. Harmonie préétablie

Ce principe de répartition égale des tensions, et donc du poids sur l'ensemble des chaînons, fait que si nous déplaçons un petit bout de la chaînette avec notre doigt, la courbe de l'ensemble de la chaînette sera

affectée et transformée. Il s'agit de l'expression du principe de moindre action, principe développé par le Cusain et Leibniz (**Encadré 3**). Il dévoile une *harmonie préétablie* qui fait que n'importe quel événement à un endroit donné affecte l'ensemble de l'univers, une réalité que la physique newtonienne est incapable d'expliquer correctement.

#### 3. Microcosme et macrocosme

Le principe précédent fait que chaque bout de chaînette est lui-

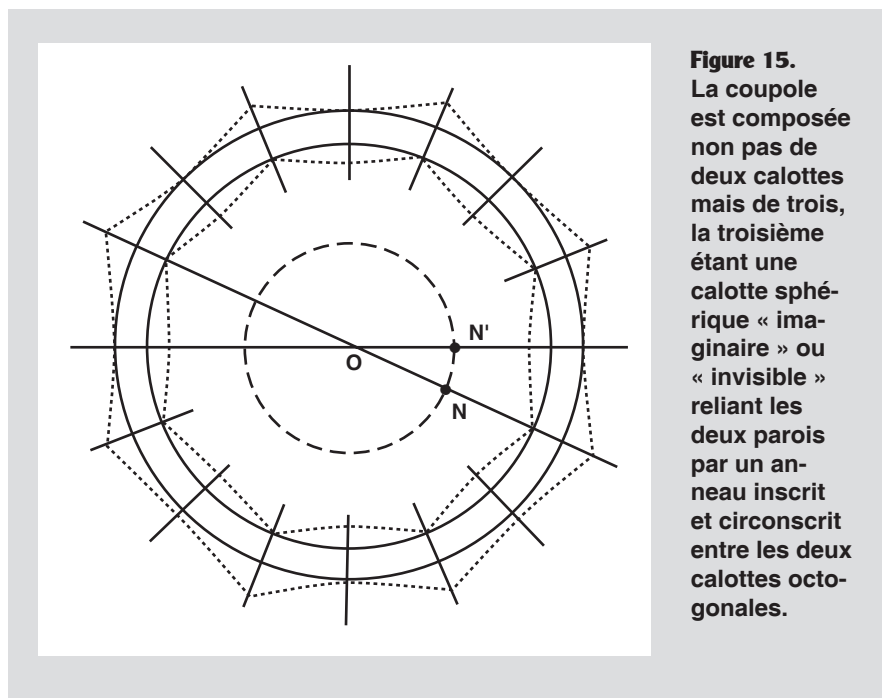
même une chaînette (**figure 14**), que le *macrocosme se reflète dans le microcosme*. Si sur une chaînette ACDB, nous relâchons A et B, alors CD reste la même chaînette qu'auparavant. Inversement, selon le même principe, la chaînette (entre ses points de suspension) est définie par n'importe quelle de ses parties, peu importe la taille. De la même façon que le grand se reflète dans le petit, le petit à son tour définit le grand (le microcosme définissant le macrocosme). Autrement dit, si l'on



regarde différentes parties d'une chaînette, on regarde différentes expressions locales d'une réalité globale, harmonieuse et équilibrée.

## La « sphericam angularem »

Avant de poursuivre sur la chaînette, il nous faut approfondir le concept de surface autoportante. Impressionné par sa visite du Panthéon, comme le commentaire d'Alberti le reflète, la première approche de Brunelleschi semble avoir été le concept d'une « *sphericam angularem* » – une sphère angulaire. Son idée consistait à transférer ou « projeter » les propriétés de solidité inhérentes à la géométrie de la sphère sur les huit pans des calottes octogonales. Pour ainsi dire, la coupole est composée non pas de deux calottes mais de trois, la troisième étant une calotte sphérique « imaginaire » ou « invisible » reliant les deux parois par un anneau inscrit et circonscrit entre les deux calottes octogonales (**figure 15**). Rowland Mainstone, un ingénieur des structures, explique que la calotte intérieure



**Figure 15.** La coupole est composée non pas de deux calottes mais de trois, la troisième étant une calotte sphérique « imaginaire » ou « invisible » reliant les deux parois par un anneau inscrit et circonscrit entre les deux calottes octogonales.

a été construite « *comme s'il s'agissait d'une calotte sphérique [...] mais avec des parties coupées de l'intérieur et de l'extérieur pour respecter la forme octogonale* ».

Brunelleschi tenait à l'élévation de cette sphère en hauteur « *afin*

*qu'elle sorte encore plus magnifique et dilatée [gonflante]* ». Sa forme ne sera pas comme une calotte appuyée sur le corps d'une église mais comme une structure de « *crêtes et de voiles* » qui se développe en extension et en hauteur.

L'architecte semble aussi vouloir reprendre ici tout un symbolisme traditionnel qui voyait l'action circulaire – expression de la perfection divine – allant à la rencontre de l'action rectiligne – expression de l'imperfection humaine. Nicolas de Cues, reprenant les défis géométriques et mathématiques lancés par Archimède, développera cette question dans ses traités portant sur la quadrature du cercle. Après tout, une église – maison de Dieu – ne devait-elle pas être l'espace médiateur entre Dieu et l'homme ? La « sphère » divine n'allait pas « nous abandonner ». Il devient ainsi clair que Brunelleschi et ses amis ont pu faire la synthèse et « *monter sur les épaules* » des meilleurs architectes de l'histoire de l'humanité.

## Une membrane autoportante en briques

Quand on monte les escaliers à l'intérieur du dôme, on constate que, sur plusieurs endroits, les motifs de la maçonnerie ont été volon-



**Figure 16.** Quand on monte les escaliers à l'intérieur du dôme, on constate que, sur plusieurs endroits, les motifs de la maçonnerie ont été volontairement laissés visibles.

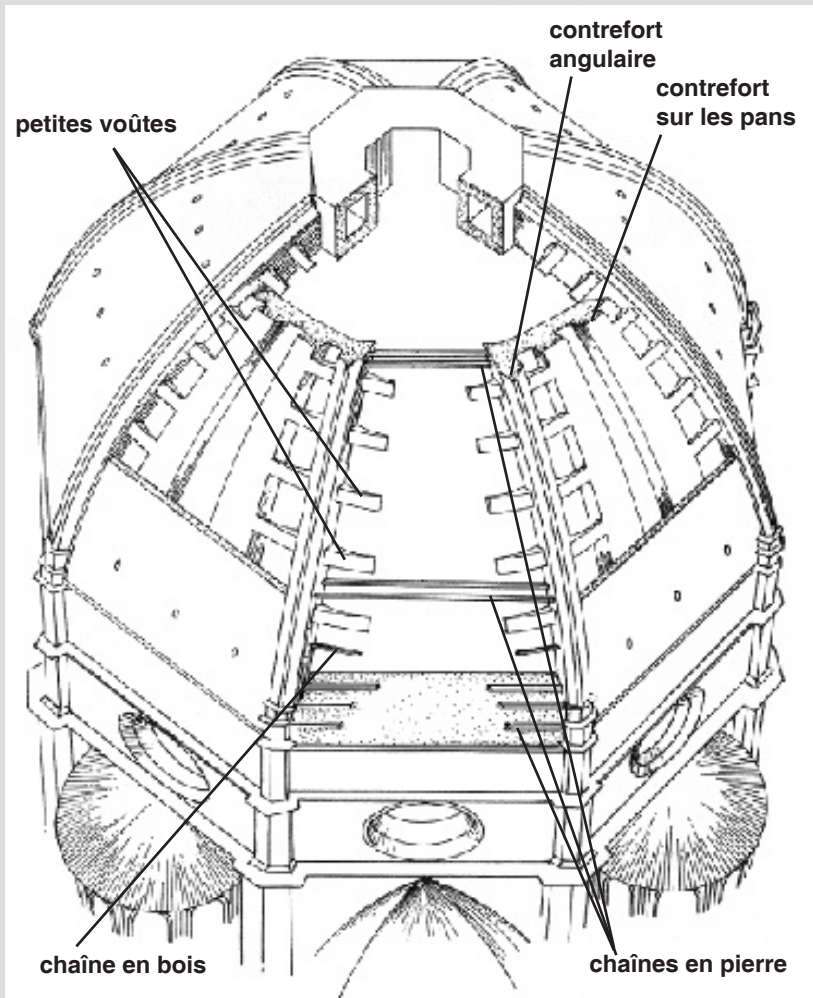


Figure 17. Vue en coupe du dôme.

tairement laissés visibles (figure 16), tandis qu'ailleurs ils sont couverts de crépi. Puisque c'est Brunelleschi qui nous les montre, on a pu en conclure qu'il voulait nous laisser cette piste pour sonder son secret. Néanmoins, ne sous-estimons pas le caractère farceur et illusionniste du personnage, après tout inventeur de la perspective, cette science de l'illusion dont Platon se méfiait tant. Si vous ne voyez pas de l'extérieur les astuces de la construction, ce n'est pas par hasard. Tout Florence fut émerveillée par le dôme et les habitants se demandèrent : « Comment cela peut-il tenir debout ? Où sont les appuis et soutiens extérieurs ? »

Une analyse de la disposition des quelque 4 millions de briques, dont certaines possèdent des formes spéciales (triangulaires, en angle, etc.) et qui sont cachées derrière les lignes droites des tuiles, nous révèle quatre nouveaux concepts importants

(figure 17).

### 1. Des contreforts invisibles

S'interdisant des contreforts à l'extérieur, Brunelleschi va élaborer tout un dispositif à l'intérieur des parois pour compenser cette absence. Comme spécifié dans son projet déposé aux Œuvres du Dôme (l'original a disparu mais a été copié à l'identique par Manetti) : « On fera 24 contreforts [sproni], dont 8 dans les angles et 16 sur les pans ; [...] ils devront assembler les deux voûtes et se rétrécir en proportion égale jusqu'en haut de l'ouverture fermée par la lanterne. Lesdits contreforts ainsi que lesdites coupes seront ceints de 6 cercles [cerchi] de pierres solides, longues et renforcées de fer étamé [reliés avec des crampons] ; au-dessus de ces pierres, des chaînes de fer [catene di ferro, entourées de plomb pour empêcher l'oxydation] entoureront ladite voûte et ses con-

trefforts. »

Après avoir spécifié les tailles de tous ces éléments et leur emplacement exact, il ajoute : « Mais le premier cercle sera renforcé par des pierres longues en travers, de façon que les deux voûtes de la coupole reposent sur ces pierres. Sur lesdites voûtes, toutes les 12 brasses environ, en hauteur, il y aura des petites voûtes en berceau [volticciuolo a botti], d'un contrefort à l'autre. » Ces « petites voûtes » permettent de renvoyer la pression des 8 grands contreforts de façon égale vers les 16 autres et surtout de la répartir sur l'ensemble de la surface qui devient ainsi portante.

Et il conclut : « [...] sous ces petites voûtes, d'un contrefort à l'autre, il y aura de grosses chaînes de chêne [catena di quercia] pour assembler lesdits contreforts et ceindre la coupole à l'intérieur, et sur ces bois une chaîne de fer. Les contreforts seront tous construits en pierre de taille et pierre résistante ; les pans de la coupole seront tous en pierre résistante et assemblés avec les contreforts jusqu'à hauteur de 24 brasses ; au-dessus, on construira en briques ou en pierres ponces [...]. »

Bien qu'utilisant les mêmes matériaux que le Panthéon de Rome, la réalisation de Brunelleschi s'inspire néanmoins de Neri di Fioravanti quand celui-ci parlait de « cercler les douves d'un tonneau ». Faute de bois, croît-on, il n'existe dans le dôme qu'une seule « chaîne » (tirant) en châtaignier, assemblée avec des éléments de fixation en chêne. En réalité, cette poutre entourant le dôme se trouve exactement au point le plus instable de la courbe si elle est mise sous pression. Suite au tremblement de terre de 557 après J.-C., des tirants en bois furent incorporés dans les bases du dôme Sainte-Sophie à Istanbul. Bien que plusieurs tremblements de terre (1510, 1675 et 1895) aient secoué Florence, le dôme a survécu sans problèmes majeurs, grâce à ce dispositif antisismique constitué par ces tirants en pierre solide, en bois et en métal.

Toutefois, pour Brunelleschi, son dôme n'était certainement pas comparable à un tonneau mais plutôt à un corps humain, fait « d'os et de chair ». Les os sont ici les 24 contreforts (comme les côtes du thorax) et les tendons sont en quelque sorte les chaînes. Un squelette équipé de



↳ tendons peut-il marcher ? Non, car il reste à définir le muscle qui tient le tout : les briques.

### 2. Les spirales en « spina pesca »

Le deuxième concept mobilisé par Brunelleschi sera la disposition des briques dite en « *spina pesca* » (arêtes de poisson), une technique héritée des Etrusques et développée au Trecento toscan (figure 18). L'arête de poisson se forme en alternant à intervalles réguliers la pose horizontale de brique avec une pose verticale. Ces intervalles réguliers sont grands en bas mais décroissent en montant pour disparaître au sommet. Ainsi se forment d'immenses spirales de briques traversant les pans et les contreforts du sommet vers le bas et répartissant le poids sur la surface portante en expansion. On peut voir sur la figure 19 la montée en spirales des briques posées à la verticale. Ce procédé consiste à dévier le plus possible la poussée du sommet, qui se concentre en principe sur les angles du dôme, vers les « voiles » de la membrane. Une fois de plus, cette technique permet d'induire les propriétés d'une sphère, et notamment la solidité de sa membrane portante, sur les pans fragiles de la coupole octogonale. Avez-vous déjà essayé d'écraser un œuf avec vos deux doigts ? Difficile, sauf si on en casse la pointe sur une table. Peut-être Brunelleschi n'était-il pas si farceur que ça...

### 3. Le calibrage des briques

Les briques, en réalité d'immenses tuiles, sont orientées d'une façon radiale vers des « points glissants » sur un axe vertical situé au centre du dôme (figure 20). On pense également que les arêtes saillantes des briques verticales ont pu servir à une équipe chargée de guider les travaux grâce à des fils directeurs ou simbleaux. En vue de l'organisation des échafaudages nécessaires pour permettre aux maçons de se hisser eux-mêmes avec leurs matériaux sur les hauteurs du chantier, on retient l'hypothèse que la coupole a été construite en *anneaux successifs* (figure 21). Le tracé de la quinte pointée correspond avec l'inclinaison des briques au sommet qui est de 60°. Si cette inclinaison vers l'intérieur des briques avait été exclusivement définie à partir d'un point unique au sol, les briques se seraient retrouvées

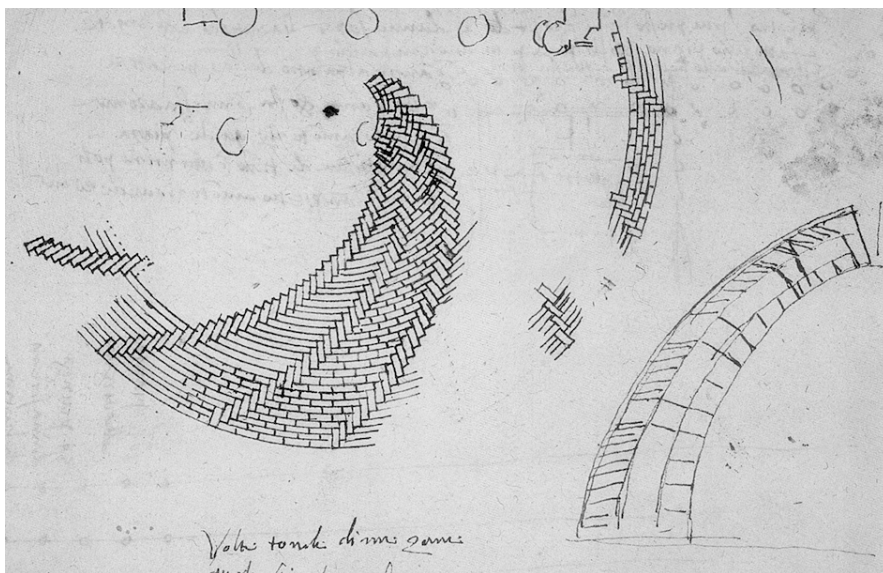


Figure 18. Disposition des briques dite en « *spina pesca* » (arêtes de poisson), une technique héritée des Etrusques et développée au Trecento toscan.

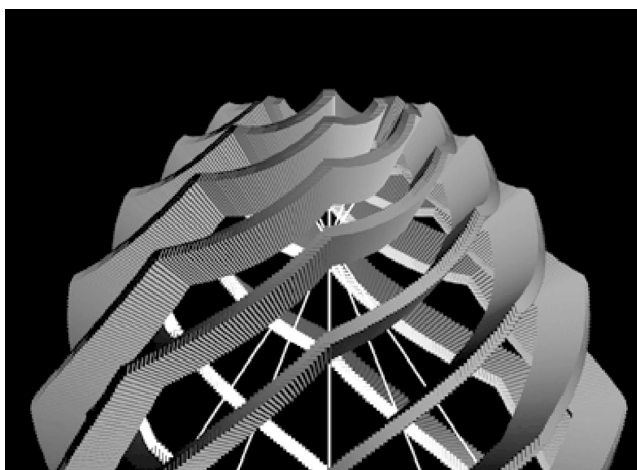


Figure 19. Montée des briques en spirales.

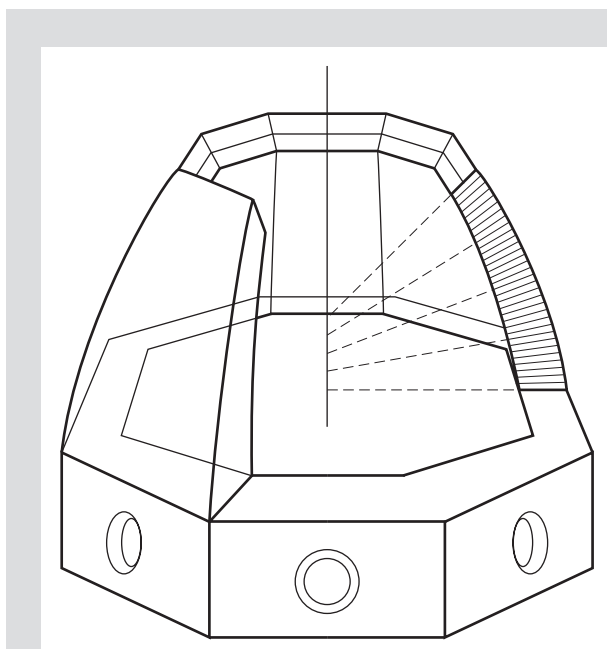


Figure 20. Les briques, en réalité d'immenses tuiles, sont orientées d'une façon radiale vers des « points glissants » sur un axe vertical situé au centre du

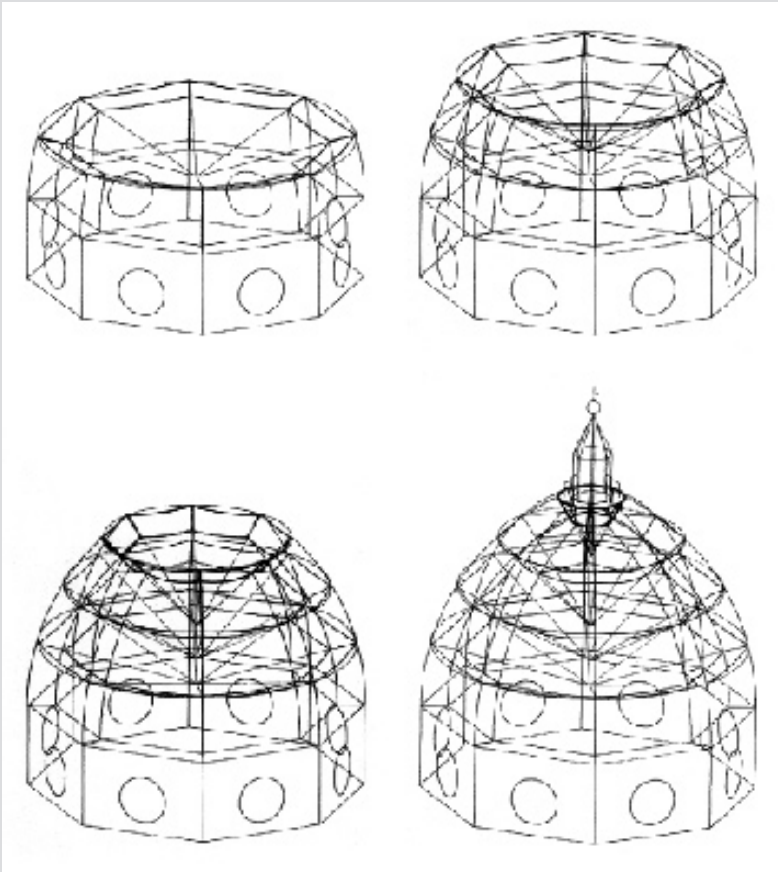


Figure 21. La coupole aurait été construite en anneaux successifs.

dans une inclinaison proche de 90°, ce qui aurait été fort gênant aussi bien du point de vue structurel que celui du cintrage.

Comme l'a démontré la maquette d'un collaborateur de *Fusion* (figure

22), Benoit Chalifoux, la rotation d'une ficelle d'une longueur donnée, accrochée à un point immobile sur la base du dôme, ne fait que tracer un ensemble de courbes géométriques évolutives – une hyperbole en bas,

une parabole au centre et une ellipse en haut – sur les pans de la calotte, à l'instar de la coupe (parabolique) générée par un taille crayon (conique) aiguisant un crayon (hexagonal). On ne peut en aucune manière obtenir la courbe physique – non algébrique – de la chaînette de cette façon, bien que Brunelleschi utilisa, lors d'une expérience précédente, « une perche fixée à la base et tournant sur elle-même vers le haut avec réduction progressive de son inclinaison » pour construire la chapelle de Schiatta Ridolfi, parfaitement sphérique.

#### 4. La chaînette de la « corda da murare »

Finalement, et c'est là que Brunelleschi nous démontre toute sa compréhension de la chaînette, nous devons étudier l'inclinaison en courbe de chaînette des lits de briques entre éperons. Cette inclinaison est parfois stupidement attribuée à l'inattention des ouvriers qui auraient laissé fléchir leur cordeau de maçon employé pour dresser les parements ! Comme nous l'avons déjà vu, depuis l'Égypte ancienne, à l'image des murs de l'enceinte d'El Kab (figure 23), on sait que les lits de briques posés en chaînette font preuve d'une solidité incomparable.

La question qui se pose maintenant est la suivante : pourquoi utiliser une chaînette orientée vers le bas et non pas une chaînette inversée, orientée vers le haut, comme toutes les voûtes que nous venons de découvrir ? Eh bien, il semblerait que

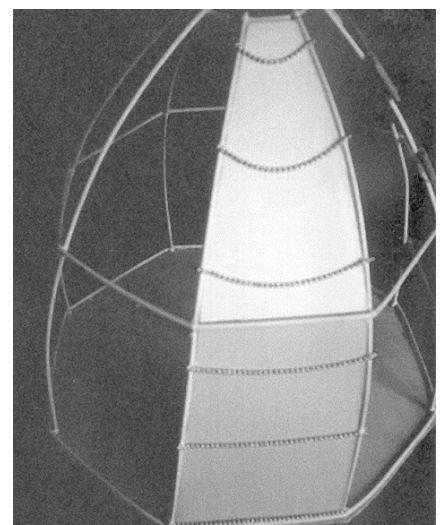
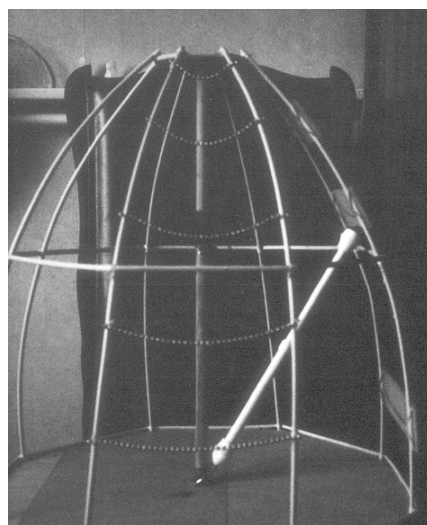
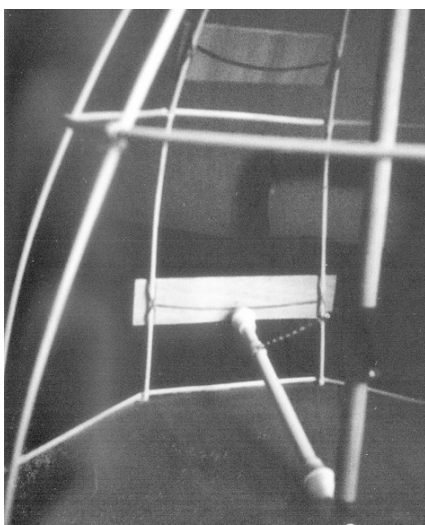


Figure 22. La rotation d'une perche d'une longueur donnée, accrochée à un point immobile sur la base du dôme, ne permet en aucune manière d'obtenir la courbe physique – non algébrique – de la chaînette.



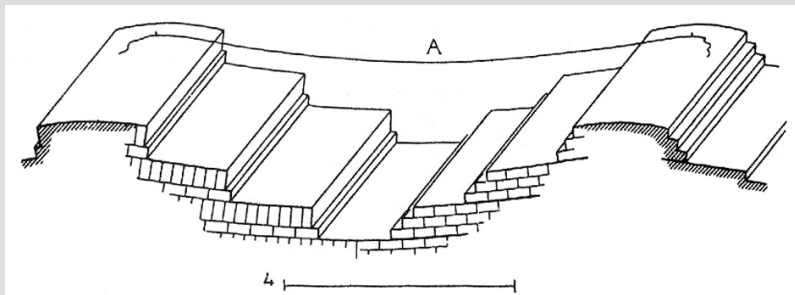
↳ la chaînette est efficace dans les deux directions : vers le haut et vers le bas ! Ainsi, les lits de briques en chaînettes créent une contrepoussée permettant de retenir les angles de la coupole, comme par exemple le voilage en courbes négatives d'un parapluie qui retient les gaines. Une fois de plus, l'illusionniste Brunelleschi s'amuse à ébranler nos certitudes.

C'est uniquement cette utilisation complexe et scientifique des propriétés de la chaînette qui permirent Brunelleschi de réussir la construction du dôme. *L'harmonie du monde* qui existe entre chaque partie et l'ensemble donna cette qualité d'autosoutènement à l'édifice, tout en assurant sa solidité structurale. Chaque brique (microcosme), construite comme faisant partie d'une chaînette (expression de la moindre action), acquiert les propriétés de la chaînette, c'est-à-dire soutient un poids égal du dôme (macrocosme). A 4 millions de briques, on est plus fort que tous les contreforts de la place. Avec un minimum de matériaux, nous obtenons une surface maximale.

Une maquette (à l'échelle de 1:5) de la taille d'une maison, construite récemment dans un parc de Florence par un architecte passionné, Massimo Ricci, permet de bien voir la maçonnerie en arêtes de poisson (**figure 24**). Le professeur Ricci, pour sa part, ne croit guère à la chaînette sur laquelle il a peu réfléchi pour l'instant. Il pense qu'il suffit de construire quelques éléments de guidage déduits des courbes d'ellipses d'une forme de fleur, symbole de Santa Maria del Fiore. Signalons à ce sujet que même Brunelleschi sera rappelé brutalement à l'ordre par... la chaînette car, pendant l'été 1429, des fissures apparurent sur les murs latéraux de la partie orientale de la nef. Au lieu de construire des contreforts, Brunelleschi en profita pour imposer le plan d'origine de Neri. Les absides autour de la nef formèrent ce qu'il appelait une « *catena totius ecclesie* » (une chaîne autour de l'église), capable d'absorber la poussée.

## La découverte de l'Amérique

Brunelleschi : perspective linéaire



**Figure 23.** Depuis l'Egypte ancienne, à l'image des murs de l'enceinte d'El Kab, on sait que les lits de briques posés en chaînette font preuve d'une solidité incomparable.

et sphère angulaire, science des coupes ; le Cusain : la *Quadrature du cercle* ; le peintre flamand Van Eyck : peinture et une mappemonde ; son maître Roger Campin peint des « sorcières », miroirs sphériques ; le miniaturiste Jean Fouquet : la perspective sphérique ; Toscanelli, l'astronomie, la perspective et la cartographie. Si on regarde les domaines divers sur lesquels ces scientifiques ont travaillé, on constate finalement qu'ils se préoccupaient tous d'un même sujet : la topologie non linéaire.

En effet, perspective, optique, cartographie et les problèmes d'architecture auxquels fut confronté Brunelleschi s'unissent dans une même question : comment les propriétés d'une sphère peuvent-elles se projeter sur un plan ? Et il y avait

cette liberté d'esprit, que l'on appelle aujourd'hui pompeusement la « recherche pluridisciplinaire décloisonnée », qui faisait que tout progrès dans un de ces domaines amenait un progrès dans l'autre.

Toscanelli ne souffrait point de ce genre de frustrations. Ross King écrit dans son livre récent *Brunelleschi's Dome*, qu'en 1475, âgé de 78 ans et avec l'accord de l'Œuvre du Dôme, Toscanelli aurait monté les 463 marches pour installer au sommet du dôme une plaque en bronze pourvue de petits trous. Grâce à une jauge spéciale sur le sol, Toscanelli fit du dôme le plus grand cadran solaire du monde à cette époque ! Ces observations, destinées officiellement à connaître la date exacte de Pâques, lui permirent de corriger toutes les observations précédentes concer-



**Figure 24.** La maquette du dôme réalisée par Massimo Ricci.

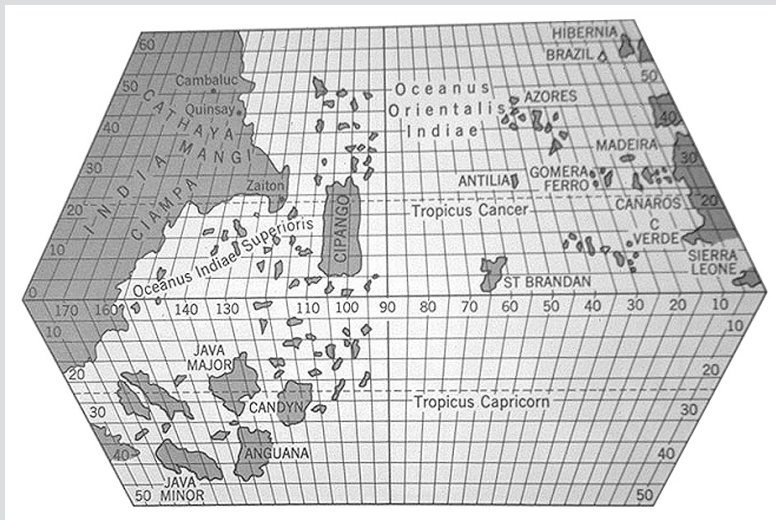


Figure 25. Reconstitution de la carte de Toscanelli.

nant les équinoxes et les solstices.

Or, pour voyager en haute mer avant l'apparition du quadrant et du sextant, on utilisait essentiellement la boussole et l'astrolabe pour mesurer l'angle entre l'horizon et l'étoile polaire. Néanmoins, ces observations ne trouvèrent une utilité pratique que grâce à la correction obtenue au moyen de tables d'éphémérides nautiques, en particulier les tables Alphonsines établies en Andalousie sous Alphonse X (le sage) par des astronomes arabes dirigés par le juif Isaac Ben Sid en 1252. Toscanelli correspondait avec Regiomontanus (Johann Müller) de Nuremberg (1436-1476), qui, avec son précepteur, le mathématicien autrichien et ami du Cusain, Georg Peurbach (1423-1461), établirent de nouvelles tables d'éphémérides pour la période de 1475 à 1506. Un élève de Regiomontanus, Martin Behaim (1459-1507), sera le conseiller du roi Jean II du Portugal à Lisbonne, où il a pu croiser Christophe Colomb. Behaim travailla beaucoup sur les latitudes en mer et fabriqua des astrolabes en cuivre, plus précis que ceux en bois. Le plus ancien globe terrestre que nous connaissons, qui date de 1492, est de sa fabrication.

Ainsi, on peut dire que les observations que Toscanelli effectua sur le toit du dôme de Florence rendirent possible l'éclosion d'une nouvelle science. Au-delà de la navigation côtière, renaissait la navigation astronomique.

Déjà, dès 1419, année de la décou-

verte de Madère, Henri le Navigateur avait fondé un centre de recherche maritime à Sagres au service des explorateurs portugais. Après la chute de Constantinople en mai 1453, la route de la soie et des épices fut fermée en Orient et l'on chercha des routes passant par le sud en contournant l'Afrique. Mais surtout, Toscanelli avait recueilli les récits de nombreux voyageurs d'Extrême-Orient. En particulier, il a eu un long entretien avec l'ambassadeur du Cathay (Chine). Comme le rapporte Toscanelli lui-même : « *A l'époque du pape Eugène IV [l'époque du Concile de Florence, 1438], un ambassadeur est venu vers lui pour lui exprimer les grands sentiments d'amitié pour les Chrétiens, et j'ai eu une longue conversation avec l'ambassadeur sur beaucoup de questions.* »

Le 25 juin 1474, Toscanelli envoie sa fameuse lettre avec une carte à un ami à Lisbonne, le chanoine Fernan Martinez de Roriz, qu'il avait rencontré à Florence. Martinez figure d'ailleurs avec Toscanelli dans le dialogue scientifique du Cusain *La Quadrature du cercle*. Dans cette lettre, Toscanelli lui assurait que le chemin le plus court pour voyager vers le Cathay, à l'est, passait par l'ouest. Martinez, confesseur du roi du Portugal, ne réussit pas à convaincre son souverain mais quelqu'un de sa famille, un jeune capitaine de bateau génois dénommé Christophe Colomb, lequel avait vu passer la lettre et allait écrire à Toscanelli vers 1480. Bien que le vaillant

Colomb prétendit ne jamais avoir eu recours à des mathématiques ou une carte, dans ses bagages se trouvait une carte de Toscanelli (figure 25) et très probablement les tables d'éphémérides obtenues grâce au cadran solaire du dôme.

Au-delà de la découverte de l'Amérique, la navigation astronomique deviendra une science capable d'en découvrir des milliers. Ainsi, le chantier du dôme ne se limita pas à 37 000 t de briques ou à un simple objet de contemplation esthétique, mais son « âme immortelle » provoqua une vague de révolutions scientifiques de par la planète dont chacun pourra encore bénéficier demain. ■

### Bibliographie

- Choisy, Auguste : *"Histoire de l'Architecture"* ; Bibliothèque de l'image, 1899.
- Chalifoux, Benoit : *"Réflexions sur le dôme de Brunelleschi"*, papier de recherche, 2003.
- Director, Bruce : *"The long life of the Catenary : from Brunelleschi to La-Rouche"*, Fidelio, Summer/Fall 2002.
- Fitchen, John : *"The Construction of Gothic Cathedrals"*, University of Chicago Press, 1961.
- Gärtner, Peter : *"Brunelleschi"*, Köne-mann, Cologne, 1998.
- Hamerman, Nora and Rossi, Claudio : *"The Apollo project of the Golden Renaissance, Brunelleschi's dome"*, 21st Century, July-August 1989.
- King, Ross : *"Brunelleschi's Dome"*, Pimlico, Random, Londres, 2003.
- McLean, Alick : *"L'architecture des débuts de la Renaissance à Florence"*, dans *"La Renaissance italienne"*, Editions de la Martinière/Könemann, Cologne, 1995.
- Mainstone, Rowland J. : *"Developments in structural form"* ; MIT press, Cambridge, Mass., 1975.
- Manetti, Antonio : *"Vie, fortune et oeuvre de Filippo Brunelleschi"*, dans *"Brunelleschi"*, Ecole Nationale des Beaux Arts, Paris, 1985.
- Marchini, Giuseppe : *"Le Baptistère et le dôme de Florence"*, Beccocci, Florence, 1972.
- Matteoli, Lorenzo : *"Ser Filippo Brunelleschi and the Dome"*, Nov. 10th, 2002, Internet.
- Murray, Peter : *"L'architecture de la Renaissance italienne"*, Thames & Hudson, Londres, 1969.
- Prager, Franck D. and Gustina Scaglia : *"Brunelleschi, Studies of his technology and inventions"*, M.I.T., Cambridge Mass., 1970.
- Scarre, Chris : *"Monuments du monde ancien"*, Hazan, Paris, 2000.
- Vasari, Georgio : *"La Vie des Grandes Artistes"*, Club du Livre, Paris, 1954.