

## PERIODES CHRETIENNE, BYZANTINE, ISLAMIQUE

### Coupoles ou dôme

Une **coupoles** est une voûte hémisphérique, de profil semi-circulaire, elliptique (forme variable selon le volume généré par la révolution d'un arc autour d'un axe) ou polygonal, parfois exhaussée par un tambour.

La toiture de cette voûte est un **dôme**. Chaque assise forme un anneau de voussoirs dont les lits sont inclinés vers l'intérieur. Le terme italien exact est volta a cupola (« voûte à coupole »).



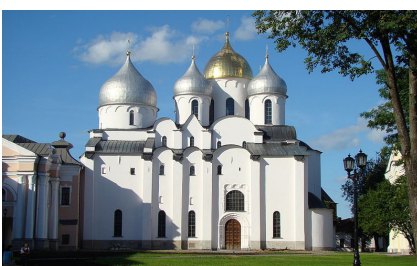
Eglise San Vitale de Ravenne, VIe siècle. (www.fr.wikipedia.org)



Dôme du Rocher, Qubbat As-Sakhrah, Jérusalem, VIIe siècle (www.fr.wikipedia.org)



Eglise arménienne Sainte-Croix, Akhtamar, Turquie, Xe siècle (www.fr.wikipedia.org)



## STRUCTURES PORTEUSES VOÛTEES DANS LA CONSTRUCTION MASSIVE

### COUPOLES, DÔMES

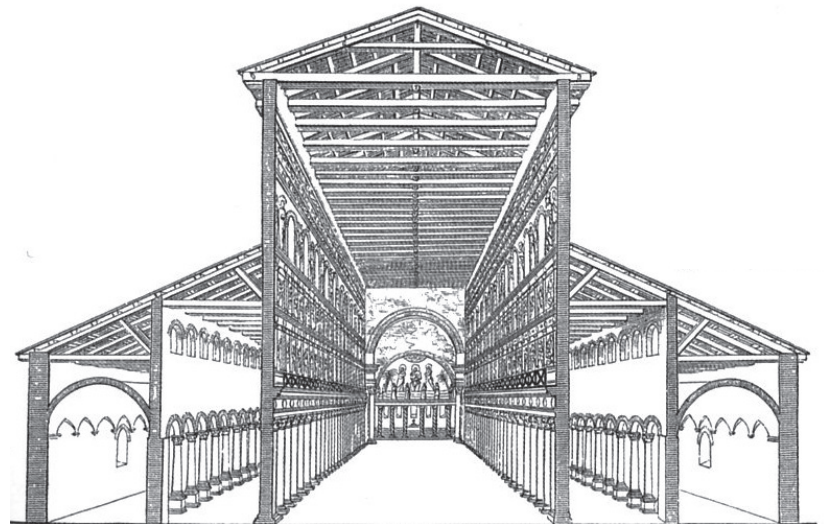
#### L'espace chrétien

Réf. n°17, pp 46-49

Les chrétiens choisirent les formes de leur temple dans l'architecture hellénistique et romaine : l'église conjuga l'échelle humaine des grecs et la conscience de l'espace interne des romains.

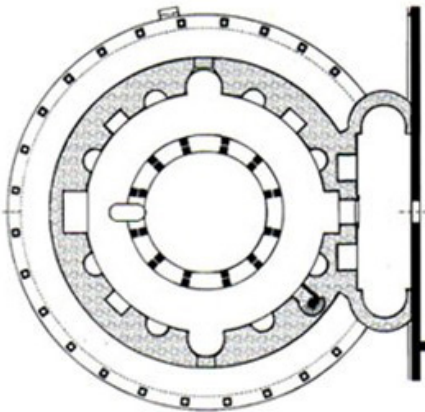
Au nom de l'homme, les chrétiens accomplirent dans l'espace latin une révolution fonctionnelle. L'**église chrétienne** est un lieu de réunion, le lieu de prière des fidèles. Sa forme se réclamât donc davantage de la **basilique** que du temple, tout en réduisant les proportions de la basilique romaine.

La révolution spatiale consista dans l'ordonnement de tous les éléments de l'église selon la ligne du chemin de l'homme. La basilique romaine est symétrique par rapport à deux axes : colonnades contre colonnades, abside contre abside. Elle crée un espace qui possède un centre précis et unique, en fonction de l'édifice et non du chemin de l'homme. L'architecte chrétien supprime l'abside et déplace l'entrée sur le petit côté. Il rompt ainsi la double symétrie du rectangle, conserve un seul axe longitudinal et en fait une ligne directrice. Toute la conception planimétrique et spatiale, toute la décoration obéissent à ce caractère dynamique : **la trajectoire de l'observateur**. Les Grecs avaient atteint l'échelle humaine par un rapport statique de proportions entre les colonnes et la stature de l'homme. Le monde chrétien glorifie le caractère dynamique de l'homme, et **oriente** l'édifice selon le sens de son chemin, construisant et refermant l'espace au fur et à mesure de son déplacement.

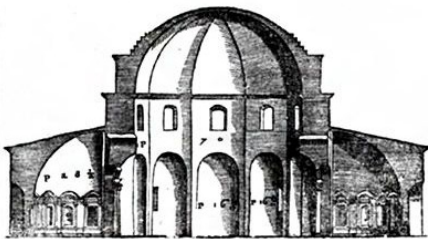


La basilique chrétienne, comme la basilique païenne, une salle rectangulaire constituée d'une longue nef, flanquée de deux bas-côtés et éclairée par les ouvertures, et recouverte d'un toit en **charpente de bois** ou à caisson (ou en forme de voûte, particulièrement au Proche-Orient). Les murs étaient généralement construits en brique ou d'un mélange de brique et de mortier. A la différence de la basilique païenne, la basilique chrétienne a une nouvelle orientation est-ouest : l'autel à l'est, l'entrée à l'ouest.

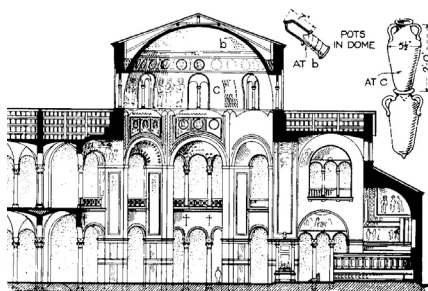
A gauche : Eglise russe orthodoxe Sainte-Sophie, Novgorod, Russie, XIe siècle (fr.wikipedia.org)



Plan du mausolée Saint-Constante, Rome, IVe siècle ([www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org)).  
Sainte-Constante supprime le sens romain de gravité statique et indique au spectateur de chaque point de l'anneau le centre de l'édifice par l'orientation radiale des colonnes, la suggestion linéaire de l'entablement qui les surmonte. (réf. n°17, pp 46-49).



Coupe du temple de Minerva Medica, Rome, IVe siècle. Bâtiment dodécagonal en brique - *opus latericium* (appareil en briques crues) - de 24 m de diamètre pour 33 m de haut. Il est cité dans l'article *Voûte* du *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, de 1856 d'Eugène Viollet-le-Duc. ([www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org))



Coupe église San Vitale de Ravenne, VIe siècle. ([www.hughellwood.files.wordpress.com](http://www.hughellwood.files.wordpress.com))

Vue de la voûte et des mosaïques murales de l'église San Vitale, Ravenne, VIe siècle ap. J.-C. ([www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org)).

La **technique de la mosaïque** était surtout utilisée par les Romains comme revêtement des sols ; murale, elle était de petites dimensions. Dans l'art chrétien, les mosaïques deviennent murales et de grande taille. Ces grandes surfaces brillantes et scintillantes contribuent au faste voulu des intérieurs des églises chrétiennes de l'époque, par ailleurs d'**aspect humble et dépourvu de l'extérieur**.

### Edifices ronds ou polygonaux

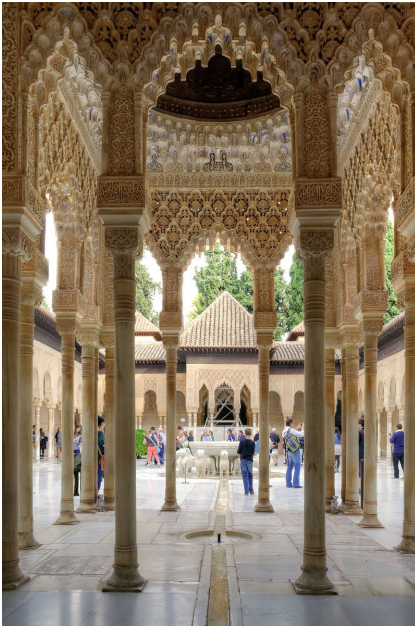
Réf. n°17, pp 46-49

Autre type d'édifices adopté par l'architecture chrétienne à l'époque de Constantin sont les constructions rayonnantes couronnées d'une coupole qui deviennent des baptistères ou chapelles funéraires. De même, dans les édifices circulaires, alors que le Panthéon est statique, centré uniformément, sans aucun passage d'ombre et de lumière, le temple de **Minerva Medica** s'oppose à la staticité précédente, dilatant l'espace dans les niches ombreuses, tout en restant dans l'adjectif du coffre mural. Quant au mausolée de **Sainte-Constante**, grâce à son espace en forme d'anneau, une nouvelle articulation spatiale offre une dialectique d'ombres et de lumières.

### Eloquence de Byzance

Le thème de la basilique paléochrétienne s'exalte pendant la période byzantine. L'architecte byzantin intègre dans le schéma longitudinal paléochrétien l'urgence d'une accélération (Sainte-Sabine à Rome, Sainte-Appollinaire à Ravenne) : les rapports verticaux s'annulent et le rythme directeur s'exaspère. De manière identique, dans les édifices à thème central, plus particulièrement dans la grande trilogie de l'ère justinienne, Saints Serge et Bacchus, Sainte Sophie à Constantinople et San Vitale à Ravenne, l'espace se dilate, jusqu'aux étirements les plus tendus. La dilatation de l'espace romain, aussi vaste et techniquement courageuse qu'elle fût, trouva sa limite dans la robustesse de l'ossature murale. Il s'agit d'un **espace dilaté** mais statique. L'espace byzantin est plus que dilaté, il « se dilate » : il possède en lui-même un élément dynamique conquis à travers la culture paléochrétienne, l'usage des plans de lumière, des vastes superficies lumineuses qui se développent en tapis chromatiques. Ces tapisseries de mosaïques exaltent la nouveauté de la recherche byzantine. L'architecte crée une superficie murale qui se plie et s'éloigne du centre, toujours plus loin vers l'extérieur. Cette époque architecturale fera retentir sa voix dans les siècles suivants, au XIe et au XIIe siècles, lorsque naîtront San Marco à Venise ou la Martorona à Palerme, qui lancera son écho dans toute l'architecture orientale, en Russie particulièrement et qui, même au Quattrocento, tentera de résister à l'humanisme italien.





Cour des Lions, Alhambra, Grenade, Espagne, XV<sup>e</sup> siècle. ([www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org))

Les **muqarnas** sont un motif ornemental de l'architecture islamique depuis l'époque médiévale. Il s'agit d'éléments décoratifs en forme de nids d'abeilles et réalisés en stuc peint, en bois, en pierre ou en brique. Ces éléments dégringolent en stalactites ou garnissent les voûtes ou l'intérieur des coupoles de nombreux bâtiments musulmans. Les muqarnas tirent leur origine des réfugiés duodécimains (groupe des chiïtes qui croient dans l'existence des douze imams) dans les grottes calcaires des monts Elbourz du nord de l'Iran, pleines de stalactites, pour échapper aux Seldjoukides (tribus nomades d'Asie centrale).



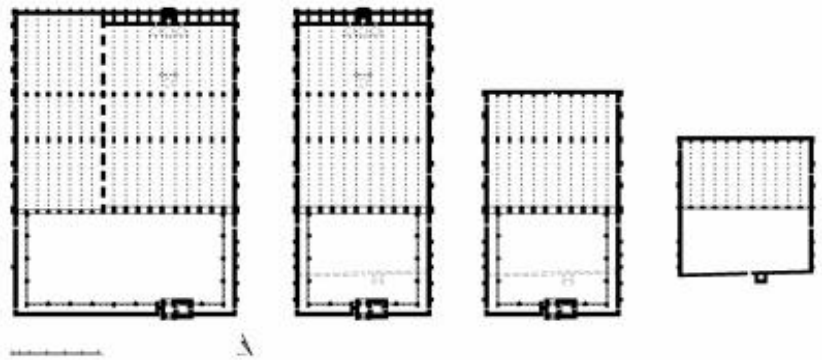
Au commencement lieu de culte et de réunion pour les prises de décisions importantes, la mosquée était un simple terrain entouré de murs. Elle s'est développée sous la forme d'une salle hypostyle couverte d'un toit plat sur le modèle des bâtiments égyptiens. La *Qibla* est un mur aveugle et orné d'une niche, le *mihrab*, faisant face à la Mecque. La forme de la mosquée s'est embellie d'un portique (*sahn*) qui débouche sur une salle de prière (*haram*). Depuis le 12<sup>e</sup> siècle, la cour est décorée sur ses côtés de portails d'entrées monumentaux (*iwan*). Les fidèles sont appelés à la prière depuis le sommet du minaret. (Texte réf. 24, p 48, image [www.obediencies.net](http://www.obediencies.net))

### Architecture islamique, ottomane

Les modulations stylistiques de l'architecture islamique respectent toutes le principe de la **non-représentation anthropomorphique**. Prohibition d'ordre religieux, étendue à tout être vivant à l'exception des plantes. Ces dernières, avec les motifs géométriques et les inscriptions coufiques constituent ainsi les éléments décoratifs les plus courants dans l'architecture islamique. Les arches très représentatives de cette architecture, revêtent plusieurs formes : en fer à cheval, à quatre centres, entrelacées, en bulbe. Les muqarnas (série d'alvéoles en nid-d'abeilles donnant du mouvement à une surface) constituent une décoration typique des plafonds et des murs. L'architecture islamique, notamment celle des Omeyyades, première dynastie islamique, (661-750), s'inspire des modèles gréco-romains et byzantins. (réf. 24, pp 122)

Peuple nomade, les Arabes ne construisaient guère, mais avec la conquête des grandes cités méditerranéennes et orientales, ils durent rivaliser, en Terre sainte (Syrie, Palestine et Jordanie) comme en Egypte et en Mésopotamie, avec les architectures antiques et chrétiennes. Ils le firent avec force créatrice particulière. L'architecture devint ainsi l'art par excellence de l'Islam, qui fit preuve d'une grande inventivité en matière typologique, mais aussi d'un goût décoratif qui a fasciné tout au long des siècles les populations occidentales. (réf. 21, p. 86)

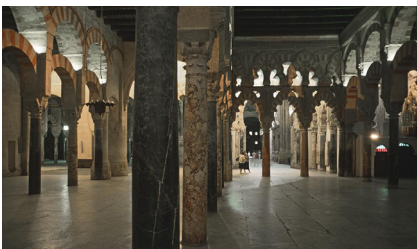
L'architecture des pays musulmans se caractérise par des types spécifiques d'édifices religieux et civils. Outre la mosquée, l'architecture islamique a produit des édifices comme le minaret, tour carrée ou cylindrique à plate-forme balconée. A partir du IX<sup>e</sup> siècle, les madrasas ou écoles coraniques développèrent un type d'architecture commun, qui comprend au moins un *iwân* ou grande salle voûtée où est lu le Coran ainsi que des cellules pour élèves, professeurs et officiels ordonnés autour d'une petite cour ou sous un dôme. (réf. 24, pp 123).



La **mosquée-cathédrale de Cordoue**, ou grande mosquée de Cordoue. Nom ecclésiastique officiel Église-Cathédrale de Notre-Dame de l'Assomption est un ancien temple romain qui devint église puis mosquée, et dans laquelle fut ensuite érigée une cathédrale. C'est un monument majeur de l'architecture islamique, témoin de la présence musulmane en Espagne du VIII<sup>e</sup> au XV<sup>e</sup> siècle. Monument le plus accompli de l'art des Omeyyades de Cordoue. La mosquée fut agrandie trois fois de suite par les successeurs d'Abd-Al-Rahman I<sup>er</sup>, pour finir par couvrir 23 000 m<sup>2</sup> et devenir ainsi la plus grande mosquée du monde après celle de La Mecque. Cette mosquée n'est pas orientée par rapport à la Mecque. Elle se présente aujourd'hui sous la forme d'un vaste quadrilatère d'environ 180 m de long sur 130 m de large, comptant dix-neuf nefs et plus de 850 colonnes de réemploies (*spolia*) surmontées par des chapiteaux antiques et paléochrétiens de styles différents qui forment un ensemble hétéroclite. (réf. 21, p 86, image aérienne et plan [www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org))



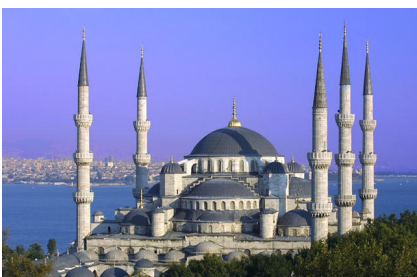
Minaret hélicoïdal de la Grande Mosquée de Samarra, Irak , 848-852. ([www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org))  
A l'origine recouverte de mosaïques vert-bleu foncé. Rampe hélicoïdale qui conduit au sommet, à une hauteur qui culmine à 52m. (Réf. 21, p. 87)



Intérieur de la Mosquée de Cordoue, Espagne



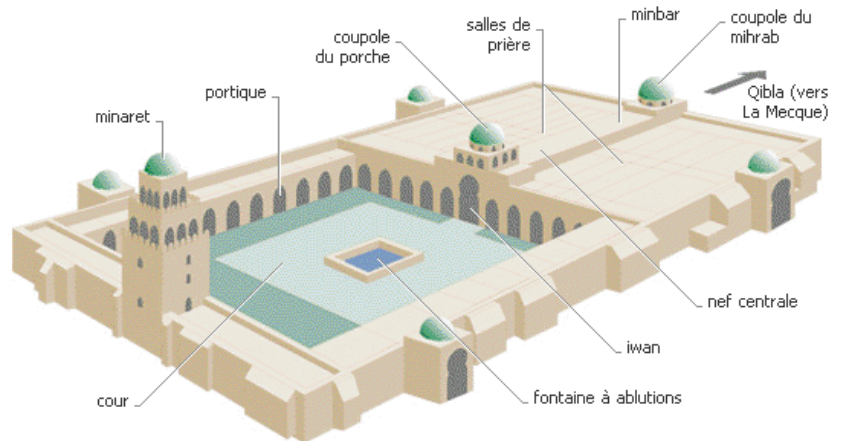
Mosquée Selimiye, Edirne, architecte Sinan, XVIe siècle.



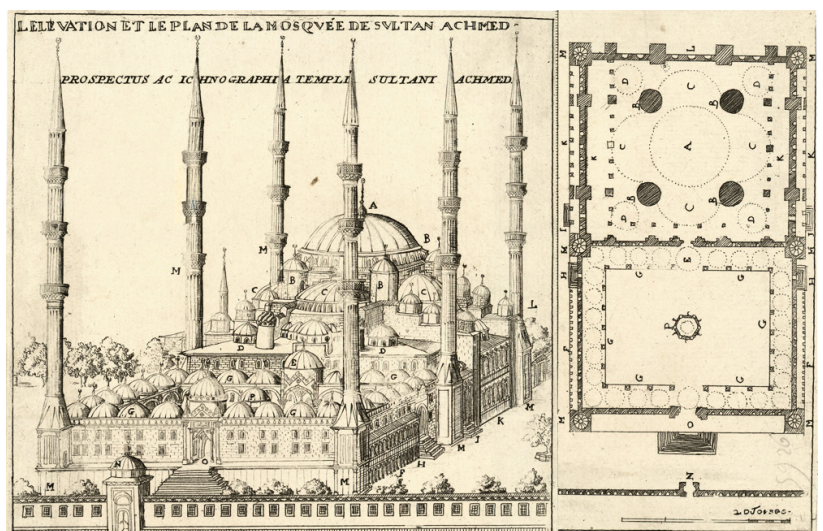
Mosquée Sultanahmet, dite Mosquée bleue, Istanbul, XIIe siècle.

La construction des coupoles, bien maîtrisée depuis le XIIe siècle, allait permettre à l'architecture musulmane de faire évoluer la structure de la mosquée à colonnades, jusqu'alors uniquement dotée de petites coupoles. Cette évolution ne se concrétisa qu'en 1539, avec la nomination de Sinan, pour qui Sainte-Sophie était devenue une idée fixe, comme premier architecte de l'Empire Ottoman. Son chef d'oeuvre, il la bâtit à Edirne : la mosquée de Sultan Selim II (1570-1574). Avec cette mosquée, qui accumule coupoles et demi-coupoles, Sinan réalise une construction d'autant plus imposante qu'elle est haute et compacte.

L'âge d'or des mosquées à coupoles, apogée de l'architecture islamique, est contemporain de la Renaissance en Occident, où la coupole joua également un rôle primordial. Les édifices sacrés de l'islam sont toutefois radicalement différents des églises chrétiennes. Compte tenu des fonctions respectives du mihrab et de l'autel, l'organisation spatiale de l'église, la perspective, la coupole jouant le rôle du ciel n'ont pas lieu d'être en Orient. (réf. 21, p. 18)



Organisation et vocabulaire mosquée ([www.obediencies.net](http://www.obediencies.net))



Mosquée Sultanahmet, dite Mosquée bleue, Istanbul, XIIe siècle. Plan et vue axonométrique.

(Images, photos [www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org))

## CONSTRUCTIONS SOUS COMPRESSION : LES ARCS ET LES BERCEAUX



III. 155 : juxtapositions et superpositions de structures en arc : concept de coupe visant à éviter d'utiliser tout matériau superflu. La construction en arc est ici motivée par des arguments techniques et économiques.  
Le pont du Gard, aqueduc romain près de Nîmes (F) 1<sup>er</sup> s. apr. J.-C.



III. 158 : voûte en brique recouverte de béton faisant office de coffrage avec tirants pour absorber les poussées horizontales.  
La construction voûtée revêt ici une signification architectonique et esthétique.  
Le Corbusier, maisons Jaoul, Paris (F) 1955

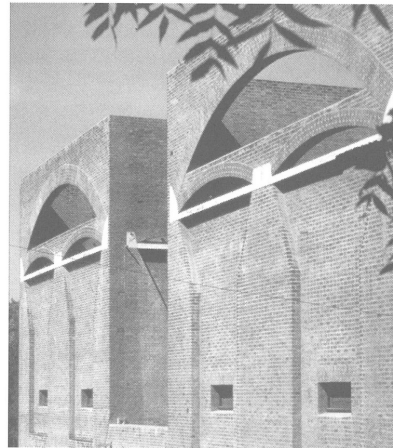
Dans le cas des constructions sous compression, l'« inconvénient » du poids de la structure devient un atout inhérent à la structure porteuse.

L'édification des constructions arquées et voûtées suit des critères identiques, d'autant plus qu'une voûte en

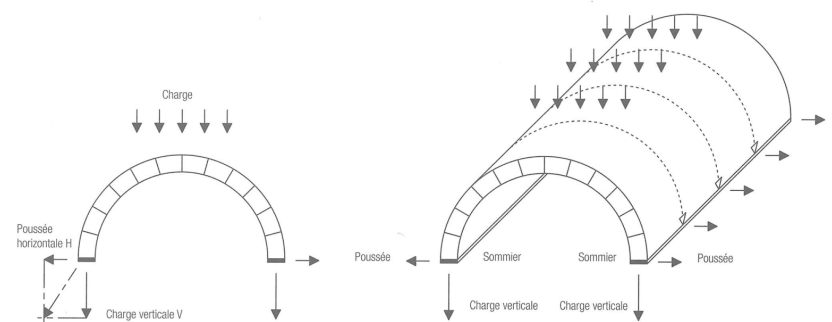
berceau n'est, en fin de compte, rien d'autre qu'une surface incurvée en forme d'arc ou une succession d'arcs. La question de la stabilité latérale a plus d'importance pour l'arc, car il est, en règle générale, partie intégrante d'un mur, lequel relève des conditions mentionnées plus haut (« Structures porteuses verticales »).

Dans l'exemple de Louis Kahn, les arcs géminés déchargent le mur sous-jacent et conduisent à une concentration des efforts sur les appuis. Le mur n'a pas pour autant besoin d'être renforcé, puisque le tirant de béton sous les arcs reprend les poussées, détournant les sollicitations sur un axe totalement vertical. Le rétrécissement, en forme d'entonnoir, du mur sous les arcs montre simplement que le mur ne doit supporter à cet endroit pratiquement aucun effort vertical.

Plus l'arc est plat, plus les poussées latérales augmentent. C'est la raison pour laquelle les toits en berceau surbaissé des maisons Jaoul de Le Corbusier sont consolidés par des tirants en fer. Pour l'aqueduc de Nîmes, en revanche, il a été possible d'y renoncer, car les rangées d'arcs de même hauteur, quel que soit leur aplatissement, sont synonymes de conjonction de poussées horizontales contraires et de même importance et nécessitent une reprise purement verticale des charges. Les travées extrêmes, en revanche, doivent être contrebutées.

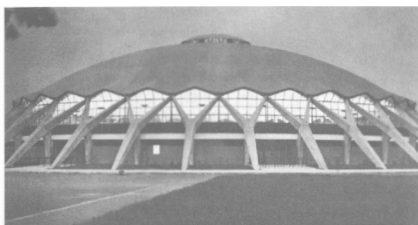


III. 157 : le tirant de béton contrebalance les poussées latérales et décharge la maçonnerie sous-jacente.  
Louis I. Kahn, Indian Institut of Management, Ahmedabad (Inde) 1962-1974

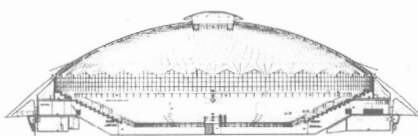


III. 156 : arc (p. ex. linteau de porte ou de fenêtre, pour grandes portées)

III. 159 : voûte

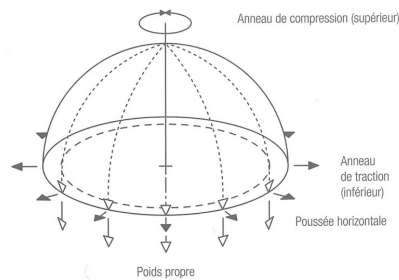


III. 163 : la coupole se divise en un anneau de piliers en forme de fourches.  
Pier Luigi Nervi, Palazzetto dello sport, Rome (I) 1957



III. 160 : le challenge a été installé sous terre, dans la zone des fondations des poteaux (sommier).  
Pier Luigi Nervi, Palazzetto dello sport, Rome (I) 1957

## CONSTRUCTIONS SOUS COMPRESSION : LES COUPOLES



III. 161 : coupole (coque de révolution)

Pour le Panthéon de Rome, l'approche envisagée fut multiple. Le poids de la coupole diminue en s'élevant, grâce à la fois à une modification de la section et à la mise en œuvre de mélanges de matériaux de poids divers. Les dimensions de la coupole sont telles que le cheminement des forces depuis le sommet reste dans la section de celle-ci. Le rehaussement extérieur des murs provoque une augmentation de poids et permet ainsi à la maçonnerie de résister à la poussée. Un anneau de traction sous la forme d'un ruban d'acier aurait aussi été possible.

Le Palazzetto dello sport de Pier Luigi Nervi est doté une coupole complexe : la coque de béton présente des plis permettant un renforcement supplémentaire et se divise en poteaux en forme de Y qui, au sommet de ce dernier, d'une part, transmettent verticalement les forces dans le sol et, d'autre part, absorbent les poussées horizontales de la coque de la coupole. Dans le sol, un ruban de béton circulaire remplit la fonction d'anneau de traction. Nervi a pu ainsi créer un espace intérieur exempt d'éléments porteurs verticaux.

Dans le cas des coupoles, comme dans celui des voûtes en berceau et des arcs, une question revient sans cesse : quelle technique adopter pour absorber, réduire et transmettre aux fondations les poussées horizontales ?

## Comportement structurel de l'arc et de la voûte d'arête

### L'arc

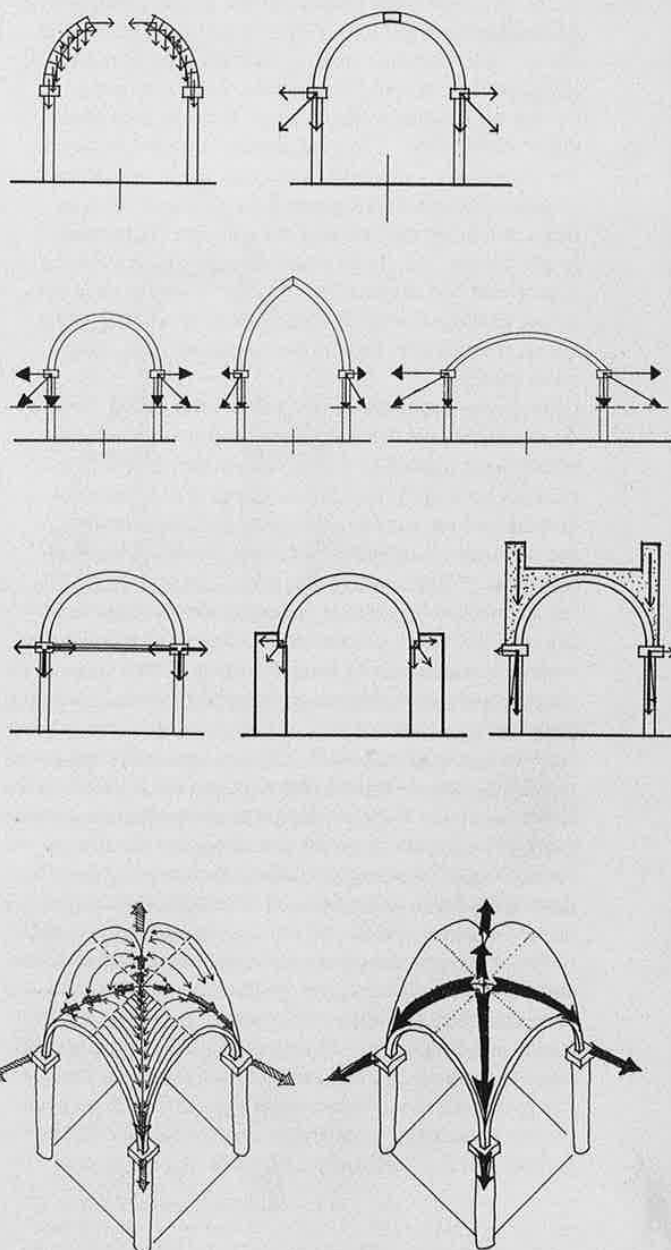
L'arc maçonné ou en pierres taillées est l'équilibre de deux demi-arcs en appui l'un contre l'autre. Les efforts de compression se concentrent à la clé (a). La première figure illustre une situation de déséquilibre. L'arc exerce aux deux appuis des poussées latérales et verticales dont la résultante est oblique. La figure suivante illustre le fait que les poussées latérales des arcs sont inversement proportionnelles à leurs cintrages. Quant au principe d'équilibrage des arcs, il consiste soit à ramener la résultante des poussées le plus près de la verticale, soit à noyer la poussée oblique dans une butée massive. La troisième figure illustre les trois cas principaux.

Il faut se rappeler la situation de déséquilibre où aucune butée ne s'oppose à la poussée oblique ensuite ; 1 — le tirant annule les poussées latérales : la résultante des forces est verticale ; 2 — un contrefort, une butée de maçonnerie absorbe la poussée oblique ; 3 — une surcharge au-dessus des points d'appui de l'arc dévie la résultante des forces jusqu'à l'axe vertical du point porteur.

### La voûte d'arête

La voûte d'arête maçonnée. Dans son principe la voûte d'arête résulte du croisement, à angle droit, de deux voûtes en berceau [fig. A-41]. Deux arcs diagonaux viennent recueillir les poussées contraires des panneaux et transmettent poussées latérales et verticales aux quatre points porteurs. La deuxième figure illustre le principe d'équilibre de la voûte d'arête, les deux panneaux exercent des poussées contraires à leur arête commune. L'arc diagonal est ainsi celui qui recueille les principales poussées. La portée de la voûte d'arête est donc celle de l'arc diagonal et non de l'arc transversal. Contrairement à la voûte en berceau dont les poussées sont continues, celles de la voûte d'arête sont ponctuelles, aux quatre appuis.

Dans leurs principes les contrebutements des voûtes d'arête sont ceux des voûtes en berceau. La voûte nervurée gothique est un cas particulier de la voûte d'arête.



## Le comportement structurel du dôme

Structurellement, le dôme semble être constitué d'une série d'arcs identiques, disposés côte à côte, suivant un plan circulaire, suggérant ainsi qu'il se comporterait sous la charge tel un arc. Les figures montrent qu'il n'en est rien. Un dôme monolithique est une construction stable.

Formé d'arcs *méridiens* et de cerclages, ou *parallèles*, qui empêchent l'écartement des arcs (ce qui peut faire penser à une barrique), le dôme ne se déformera pas comme l'arc. Le dôme s'affaisse bien sous la charge, mais on peut constater sur les figures que certains parallèles comprimés travaillent en compression, d'autres étirés travaillent en traction. Si le dôme est sphérique, un rayon abaissé de  $52^\circ$  par rapport au plan équatorial localise la hauteur du parallèle où changent les efforts.

### Dôme sur tambour

Le plan circulaire du dôme a d'abord incité à le faire porter par un mur cylindrique. Dans la mesure où un cerclage convenable raidit le dôme, le mur de soutènement ne subit que des poussées verticales. En réalité comme il a fallu attendre l'usage de fortes chaînes d'acier pour consolider les dômes, les cercler notamment à la base en raison d'efforts fléchissants, les rotondes de l'Antiquité contenaient dans l'épaisseur de la maçonnerie les poussées latérales, au risque de se fissurer (cf. chapitre sur le Panthéon de Rome). On vérifiera sur la coupe du Panthéon que les Romains enfouissaient la base des dômes dans une puissante maçonnerie, comme s'il fallait plutôt contrebuter un arc de grande portée.

### Dôme sur pendentifs

Solution byzantine, le dôme permettait de couvrir de grands espaces mais ceux-ci restaient tributaires d'un plan circulaire tant qu'on ne trouva pas la solution géométrique et constructive pour passer du plan circulaire au plan carré d'un espace délimité par quatre piliers se faisait par le biais de triangles courbes appelés pendentifs. Le dôme repose ainsi sur quatre arcs qui relient quatre piliers. Comme il en va de la stabilité des arcs reposant sur des piliers, celle des pendentifs en maçonnerie dépendra d'abord de la surcharge appliquée au-dessus du pendentif, à l'aplomb des quatre points d'appui.

FIG. A-A : Dôme, parallèles et méridiens.  
[d'après Salvadori]

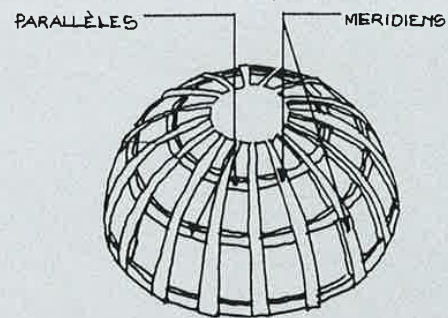


FIG. A-B : Le comportement d'un dôme sous une charge.  
[d'après Salvadori]

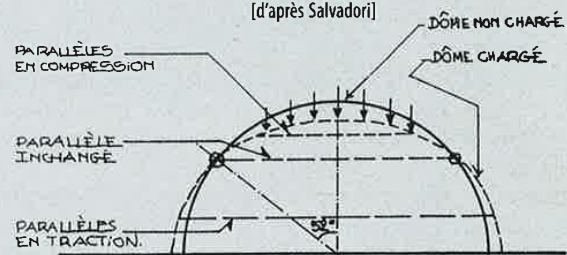


FIG. A-C : Dôme : fléchissement au-dessus de l'anneau de cerclage.  
[d'après Salvadori]

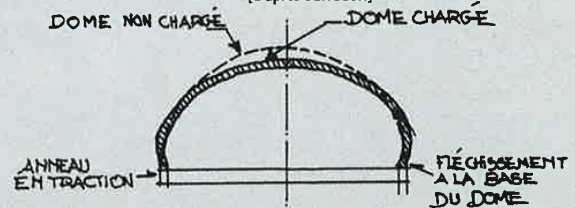
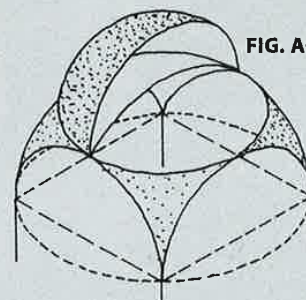
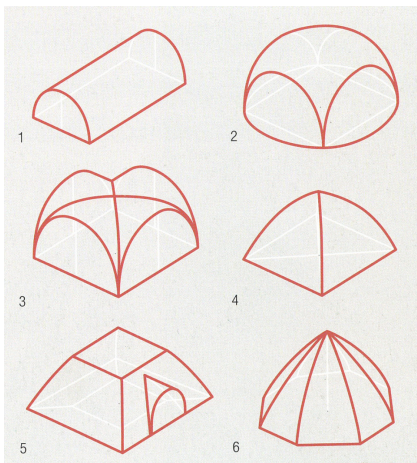


FIG. A-D : Dôme sur pendentifs.

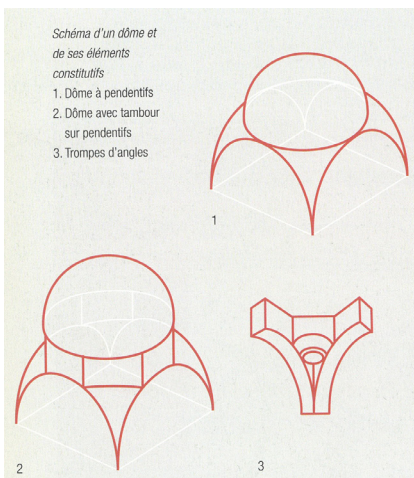




*Types de voûtes*

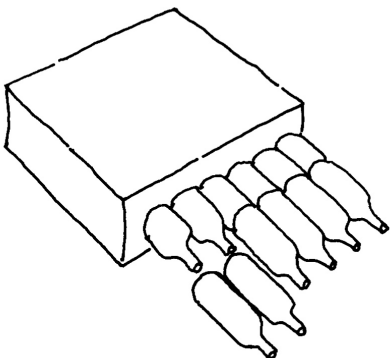
1. En berceau ou cylindrique
2. En dôme
3. D'arête
4. En arc de cloître
5. À cavet
6. En parapluie

Types de voûtes et dômes,  
réf. 24, pp 94-96



*Schéma d'un dôme et de ses éléments constitutifs*

1. Dôme à pendentifs
2. Dôme avec tambour sur pendentifs
3. Trompes d'angles

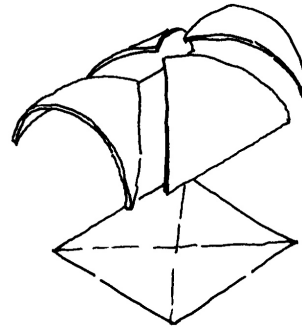


Les constructeurs byzantins avaient recours à un ingénieux système pour rendre les coupôles plus légères, en insérant un type d'amphores dans le mortier qui s'emboîtaient les unes dans les autres.

Textes et croquis, réf. 4, pp 26 et 28

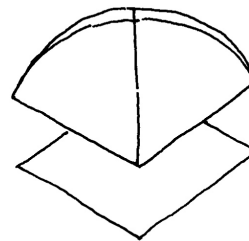
Apothèmes et fuseaux.

En coupant une voûte en berceau sur ses diagonales, on obtient quatre quartiers géométriques. Deux portions de cônes, les apothèmes ; et deux portions de sphères, les fuseaux.



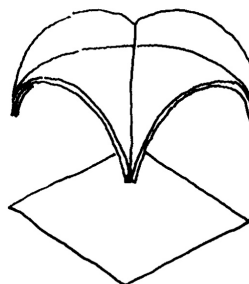
Voûte en arc de cloître.

En réunissant quatre fuseaux on obtient une voûte en arc de cloître.



Voûte d'arêtes.

En réunissant quatre apothèmes on obtient une voûte d'arêtes.



**Les coupôles.**

Un panier renversé est un très bon modèle de structure pour une coupôle parfaite. Un ensemble d'arcs qui se croisent dans le centre, avec des cercles qui les relient et les empêchent de s'ouvrir.

Grâce à des matériaux modernes comme le béton armé, il est relativement simple de construire des coupôles, mais dans l'antiquité le problème était bien plus complexe.

Grands et robustes, les arcs romains avaient l'inconvénient d'être extrêmement lourds. Comment empêcher que les coupôles ne s'ouvrent sous la pression de leur propre poids ? Avec quels matériaux, quelles ingéniosités afin d'obtenir la résistance nécessaire ?

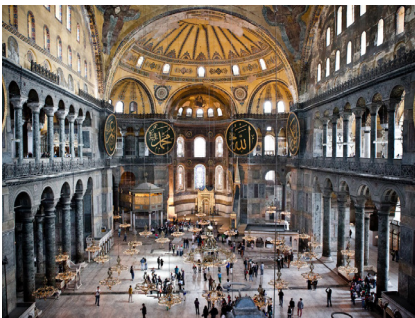


ANALYSE

# Sainte-Sophie de Constantinople, 537-562

Anthemius de Tralles, Isidore de Milet (VI<sup>e</sup> siècle)

«L'église byzantine est l'habitude du divin. Elle n'orne pas ses façades. Tout l'effort esthétique se concentre dans l'espace interne que le scintillement des mosaïques, dans la pénombre, a mission de transfigurer, lui imprimant les signes de l'invisible et le parant des splendeurs idéales de la Jérusalem céleste.»  
Georges Duby, *Le Moyen Âge, 1140-1280*, Genève, Skira, 1995, p. 83.



## Le sanctuaire, une cité féerique

Don de l'empereur Justinien au peuple de sa capitale, Sainte-Sophie s'éleva sur le forum de Constantinople. Sa hauteur et sa localisation au sommet de la citadelle lui permettaient de dominer l'entrée du détroit du Bosphore et les principaux édifices du forum, c'est-à-dire les palais impériaux et l'hippodrome dont on dit qu'il accueillait plus de cent mille spectateurs. Sainte-Sophie et l'hippodrome qu'elle jouxtait furent les lieux des grands rassemblements populaires d'une capitale au calendrier riche en fêtes, cérémonies protocolaires et processions. Gigantesques et luxueux, les deux édifices rendaient hommage à la foule byzantine dont la dévotion célébrait à la fois un Dieu solaire de rayonnement et de lumière et un empereur tout-puissant.

Édifiée au VI<sup>e</sup> siècle par Anthemius de Tralles et Isidore de Milet, la basilique devait être la plus somptueuse église de la chrétienté (ce qu'elle demeura d'ailleurs jusqu'en 1453, date de l'invasion ottomane), celle de la seconde capitale d'un empire devenu si grand qu'il avait fallu le diviser en deux parties, occidentale et orientale. Comme plus tard Saint-Pierre de Rome, Sainte-Sophie devait montrer l'exemple d'une église idéale dont la renommée guiderait les confins lointains de la chrétienté.

Pour reconstruire Sainte-Sophie dans son état de splendeur initiale, il faut comprendre le goût de la piété populaire pour le merveilleux, les prodiges et les miracles. Comme si le bâtiment avait été un don divin miraculeusement advenu là. Encore aujourd'hui, l'église est à l'intérieur une sorte de ville extraordinaire faite de rues, de places, de façades majestueuses de marbres, de portiques somptueux, surmontée d'un immense ciel d'ors et d'étoiles (fig. A-21). La disparition de l'or des mosaïques a terni son éclat mais on devine l'intensité qu'il devait avoir par l'étendue des dômes et des coupoles. Une féerie enchantée due à la grâce d'un prodige architectural revêtu d'ors et de marbres précieux au centre de quoi rayonnait une lumière surnaturelle. Pour le croyant ce ne pouvait qu'être un miracle venu récompenser la fidélité aux dogmes et la ferveur populaire<sup>1</sup>.

Il ne faut pas oublier que dans la théologie chrétienne le miracle est une manifestation tangible du divin si bien que l'édification d'un tel prodige de hauteur et de lumière, le spectacle d'une telle abondance de richesses offerte à tous devait paraître aux contemporains comme l'accomplissement mérité de la prophétie la plus populaire : l'avènement de la Jérusalem céleste que décrit minutieusement *L'Apocalypse* de Jean de Patmos.

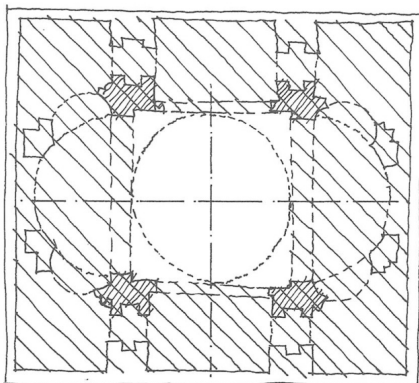
La confusion du rayonnement solaire avec celui de l'or, qui est la métaphore théologique inspiratrice de Sainte-Sophie<sup>2</sup>, a été rendue techniquement possible grâce à la mosaïque de pâte de verre. Par ce procédé (les smaltes), la feuille d'or, déposée sur un support de mortier, était protégée d'une couche de verre dont les irrégularités, par diffraction, multipliaient le scintillement.

Tant de richesses pour habiller une église ne contrevenaient pas aux dogmes théologiques. Le merveilleux chrétien, comme d'ailleurs celui de toutes les mythologies connues, dépeint sous différents aspects une nature entièrement complique et bienveillante à l'égard des entreprises humaines. C'est le cas, dans le mythe chrétien, des contrées légendaires du jardin d'Éden et de la Jérusalem céleste où les denrées et les matériaux les plus rares deviennent les plus abondants. Très présent dans la Bible sous la forme de bestiaux, d'apparitions ou de miracles, le merveilleux s'est introduit dans l'architecture chrétienne par le biais de la lumière et des matériaux précieux.

Malgré leur disparition, on devine que l'église a été faite pour ses parures de mosaïques et d'or. C'est le rayonnement recherché de la lumière et le scintillement de sa source qui guidèrent toutes les audaces architecturales de Sainte-Sophie. Les dômes furent imaginés scintillants de mille facettes dorées et leurs ouvertures ainsi que celles, innombrables, pratiquées dans les façades (cf. l'élevation ou l'axonométrie renversée fig. A-24, 25, 30), comme autant d'autres facettes scintillantes. La source solaire centrale venait d'un dôme revêtu d'or illuminant toutes les directions du sanctuaire. La géométrie idéale d'un tel projet devait être circulaire<sup>3</sup> et si elle ne fut pas adoptée c'est que la capacité d'accueil, requise pour les fastes des messes et des processions dans la nef, dépassait les possibilités

FIG. A-21 : Sainte-Sophie, diagramme du plan.

Un petit carré délimité par quatre piliers est inscrit au centre d'un grand carré. La centralité est réintroduite dans un édifice à trois nefs.



Analyse Saint-Sophie, réf. 23, pp 27-33  
photos www.fr.wikipedia.org

des plus grandes rotondes ou édifices centrés connus. En somme les préférences théologiques s'accordaient mal aux besoins quantitatifs de la liturgie.

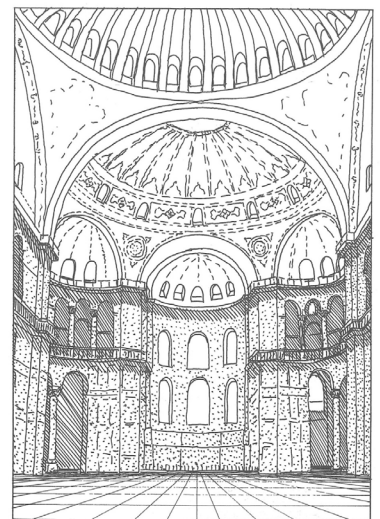
Sainte-Sophie fut une invention architecturale et typologique décisive inspirée par le gigantisme. Les récits du VI<sup>e</sup> siècle que l'on possède la révèrent autant comme prodige que comme architecture. Débordants d'adoration, ces panegyriques ménaient heureusement quelques descriptions précieuses de l'état initial de la basilique. La supériorité technique d'abord :

« On comprend instantanément, écrit Procope, que ce n'est pas là œuvre issue de la maîtrise technique ou de l'habileté humaines, mais que son origine est divine<sup>4</sup>. » — Le faste des matériaux utilisés dans les parties basses de l'église : « des prairies de marbre », « les soixante-douze teintes propres aux pierres, aux perles et à tous les métaux » (Paul le Silencieux<sup>5</sup>)

— L'illusion d'un ciel parfaitement suspendu au-dessus du sanctuaire : la grande coupole semble « suspendue au ciel par une chaîne d'or » (Procope) — Un ensemble pyramidal de dômes et demi-dômes paraissant aux voyageurs miraculeusement flotter en l'air : « Toutes les parties, aussi peu croyable fut-ce, en se tenant en suspension et en ne s'appuyant que sur la partie attenante, créent une unité harmonique exceptionnelle. » (Procope). Enfin, une sorte de prodige lumineux car la lumière intérieure donnait, à en croire toujours Procope, l'illusion miraculeuse du rayonnement : « On dirait que l'espace n'est pas éclairé de l'extérieur mais que l'éclat émane de l'intérieur, si grande est l'abondance de lumière dans laquelle baigne de tous côtés le sanctuaire<sup>6</sup>. »

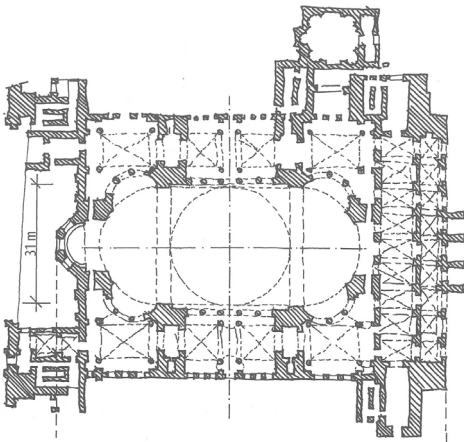
FIG. A-20 : Sainte-Sophie, Constantinople (VI<sup>e</sup> siècle), la nef.

Une cité de marbre sous un ciel d'ors. En bas, les colonnades et les galeries de la cité traversées d'ombre et de lumière s'opposent à l'éclat, en haut, d'un soleil rayonnant sur les coques des dômes revêtues de mosaïques.



**FIG. A-22 :** Sainte-Sophie, plan du rez-de-chaussée.

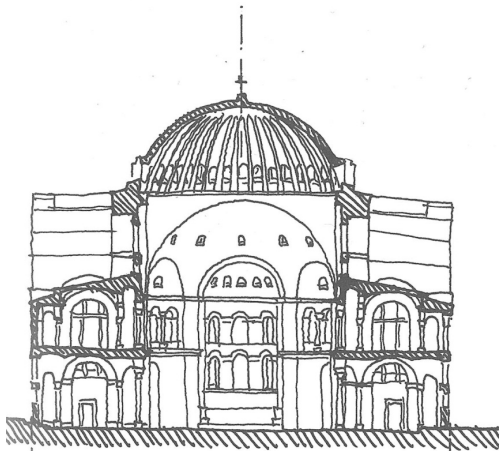
La nef principale est bordée de deux galeries (divisées elles-mêmes en trois travées). Le narthex, le vestibule (à droite) et l'autel principal dans l'abside est, sont aux deux extrémités de la nef.



**Une nef allongée dans un espace centré**

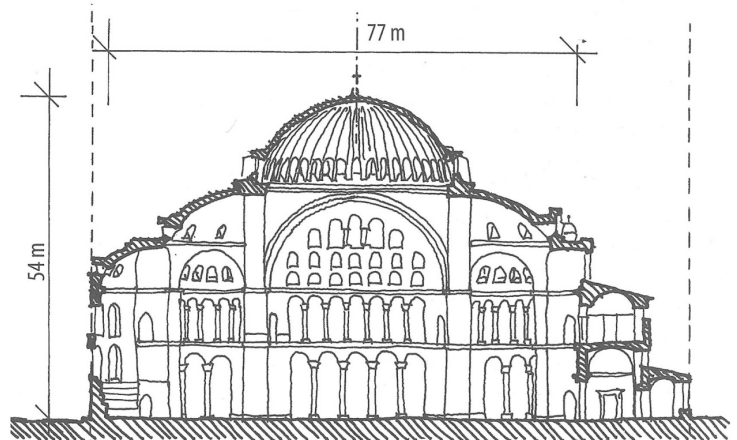
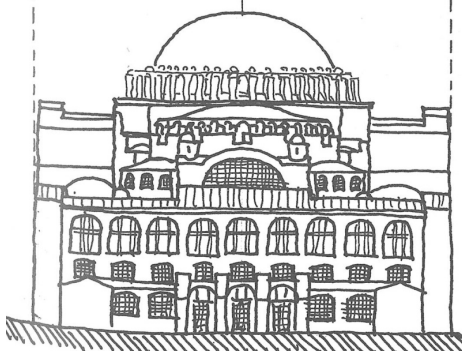
Miracle de lumière, d'immensité et de hauteur à en croire ses premiers témoins, Sainte-Sophie demeure sans doute la plus audacieuse tentative de synthèse du plan allongé et du plan centré. On vérifiera (fig. A-22-25) qu'une nef centrale haute et deux bas-côtés traversent longitudinalement l'édifice et que, cependant, un dôme et quatre piliers maintiennent une centralité. Ce fut une tentative de restauration du plan basilical habituel à trois nefs dans un espace centré en sorte que l'autel principal et l'entrée (derrière le narthex) se situent bien à l'opposé l'un de l'autre tandis qu'un dôme venait couvrir le centre du bâtiment. Une difficulté considérable si l'on songe à l'impossibilité d'inclure trois nefs de même longueur sous un dôme (fig. A-27), c'est-à-dire une nef centrale et deux galeries latérales permettant aux processions les plus populeuses de s'évacuer après avoir atteint l'autel (fig. A-23). Il fallut inventer un dispositif structurel très audacieux pour rendre la synthèse possible : le dôme reposant sur pendentifs et piliers (fig. A-31) et non plus sur un mur circulaire, ou octogonal comme il en était usuellement du soutien des dômes.

Grossièrement, un petit carré de 31 m de côté est inscrit au centre d'un grand carré de 70 m de côté. Un dôme de 31 m de portée repose, par des arcs et des pendentifs, sur quatre piles aux angles du petit carré. Ainsi s'établit, au centre du grand carré, par le biais du dôme principal et de ses soutènements, une axialité verticale sans que d'éventuels murs porteurs de ce dôme séparent le centre de l'église de la périphérie. Le petit carré central et le grand carré contenant les trois nefs sont visuellement reliés d'où qu'on soit. Jamais les galeries périphériques ne se déconnectent de l'axialité verticale du centre de même que, du centre, la périphérie reste visible en permanence. Cette réciprocité visuelle entre des nefs allongées et un centre a été un tour de force architectural. Le croquis perspectif (fig. A-20) illustre bien l'axialité de nef due à la pression latérale des deux niveaux de colonnades et du tympan muré des arcs. En revanche cette perspective masque la présence de la périphérie, la visibilité des galeries, malgré le rideau des colonnes, que révèle mieux



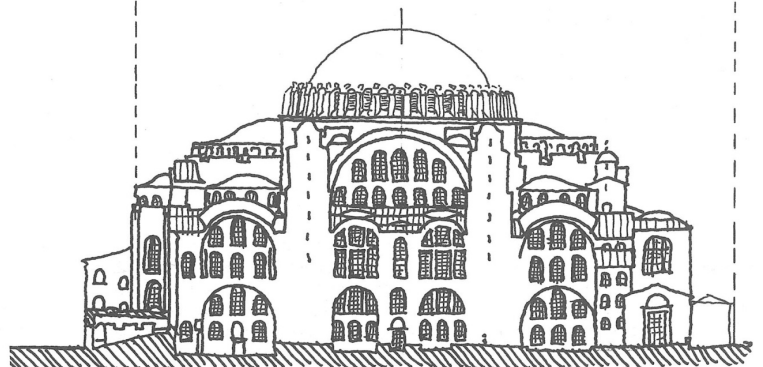
**FIG. A-23 :** Sainte-Sophie, coupe transversale (côté narthex) et élévation ouest.

Les élévations montrent le nombre considérable d'ouvertures à la périphérie du sanctuaire destinées à scintiller de tous côtés à l'intérieur.

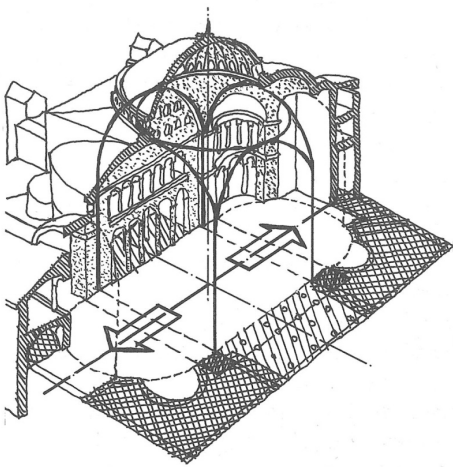
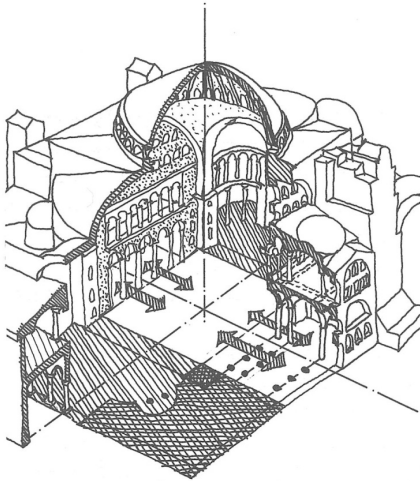


**FIG. A-24 :** Sainte-Sophie, coupe longitudinale et élévation nord.

La lumière centrale, des dômes, parvient directement dans la nef ; la lumière des parties basses, latérale, est brisée par les galeries.



**FIG. A-26, A-27 : Sainte-Sophie, la grande nef, 77 x 31 m sans point porteur.** Dans l'axe est-ouest une nef longitudinale contredit le plan centré. L'autel est à l'opposé de l'entrée (le narthex). Néanmoins l'axialité en long de la nef est aussi perceptible que le plan carré de l'enveloppe périphérique, parfaitement perceptible à travers les galeries, les exèdres et les tribunes. On le voit très bien sur la perspective de la FIG. A-21. L'axe vertical central donne son origine au rayonnement lumineux interne.



l'axonométrie renversée (fig. A-30) ou les éclatés (fig. A-26, 27). Par comparaison, une solution centralement satisfaisante comme à San Vitale de Ravenne (fig. A-6), se montre déficiente du point de vue de la nef, atrophiée. Tandis qu'ici la nef allongée offre un rectangle de 77 x 31 m libre, dégagé de tout point porteur susceptible d'accueillir en face de l'autel une foule considérable et qui se tient malgré tout sous le rayonnement d'un dôme (fig. A-22, 24).

Une fois admise la solution technique du dôme sur quatre piliers, on voit sur les coupes (fig. A-23, 24) que la nef allongée proprement dite résulte d'une dissymétrie des soutènements du dôme central. Dans l'axe principal, une pyramide de demi-dômes et de voûtes (butant les poussées des grands arcs) crée la hauteur de la nef principale (fig. A-23), dans l'autre axe les tympans des grands arcs murés (que butent des piliers-contre-forts), bordent la nef. Les éclatés (fig. A-26, 27) résument les résultats de cette dissymétrie : un axe vertical au centre qui s'élève à 54 m de hauteur, une nef longitudinale résultant du dispositif pyramidal de soutènement.

Pourtant, ce qu'aucun document ne parvient à illustrer seul de façon satisfaisante, là où même l'axonométrie renversée échoue (fig. A-29), c'est à restituer la perception simultanée de longitudinalité et de centralité, d'attraction de l'autel et de rayonnement du dôme, de frontalité et d'omni-directionnalité que contient l'inscription du dôme à l'intérieur d'une enveloppe presque carrée. Et particulièrement ce scintillement périphérique combiné à cet éclat lumineux central qu'Anthemius souhaitait pour son sanctuaire. Rendue possible par le dôme, la puissance de l'évocation solaire n'appartient cependant pas qu'à ses ors, mais aussi au scintillement de toute l'enveloppe. Si la règle liturgique concentre vers l'autel l'attention du fidèle, celui-ci se tient en même temps au centre d'une sorte de miracle lumineux provenant de toutes les parties du sanctuaire. Il ne prie pas simplement sous un soleil d'ors, mais aussi dans une ville légendaire.

### Le rayonnement interne

À plusieurs reprises, pour décrire Sainte-Sophie, Paul le Siléntaire parle de « Ville », de « Palais » et, pour communiquer quelque idée de l'abondance de matériaux précieux dont cette ville s'orne, il parle de « Prairies de marbres<sup>7</sup> ». C'est là une figure poétique symétrique de la Prairie d'étoiles qui désigne habituellement la richesse du firmament. La longue et belle énumération des couleurs et variétés de marbres acheminés des quatre coins de l'empire suggère l'égale opulence de la cité terrestre et du ciel. Témoin de l'inauguration, Paul le Siléntaire découvre le sanctuaire comme une ville fastueuse édifée sous l'éclat d'un soleil surnaturel. « La voûte contient des mosaïques à fond doré où, brillant, versant de

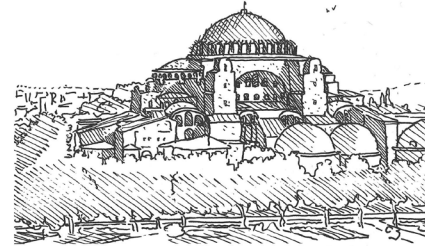
basses, au fond des galeries. En somme, la partie centrale et haute du sanctuaire émettait une sorte d'éclat zénithal, rayonnant du centre vers la périphérie, tandis que la partie basse et périphérique recevait par de grandes ouvertures une lumière latérale pénétrant en sens inverse sous les galeries.

Bien évidemment c'est la largeur des planchers des galeries qui empêchait que la lumière latérale venant de centaines de fenêtres n'aille se confondre avec la lumière zénithale dans une luminosité indistincte. En fait, l'étude de la coupe transversale apprend que les galeries reçoivent une lumière dont la pénétration vers le centre est strictement contrôlée et qui est perçue à contre-jour (fig. A-23). La luminosité des ouvertures de la partie basse du bâtiment, celle des baies des quatre premiers niveaux, sont saisies de la nef dans un violent contraste d'ombre et de lumière dû à cette épaisseur de galeries et de tribunes qui s'interpose entre la nef et les ouvertures. De là naît une opposition lumineuse entre le « Ciel » et la « Ville », entre la source rayonnante, solaire, stable, des dômes et l'ombre, variable selon l'heure du jour, des galeries et des tribunes. Ce contrôle méticuleux de la lumière latérale permet d'éclairer les galeries du sanctuaire tout en entretenant l'illusion que tout provient de l'éclat central.

L'étude détaillée de la coupe transversale prouve les précautions prises pour que la lumière qui rayonne de la nef ne contamine pas celle qui provient des façades du bâtiment et explique comment celle-ci est arrêtée avant d'atteindre la nef. De la nef, la vision que l'on a des galeries et tribunes derrière le rideau de colonnes saisit surtout des plafonds : ceux des trois voûtes qui couvrent les galeries de chaque bas-côté (fig. A-24). La luminosité que l'on perçoit venant du pourtour est donc celle d'une source lumineuse dont le flux se réfléchit sur des voûtes. La coupe transversale montre de quelle façon les trois travées des galeries conduisent puis arrêtent la réflexion de la lumière sur les voûtes (fig. A-24). La galerie externe, couverte d'une voûte en berceau dans l'axe de la coupe laisse effectivement pénétrer la lumière vers l'intérieur ; la travée centrale couverte d'une voûte d'arête à rez-de-chaussée et d'une voûte sur pendentifs (ou voûte sphérique) à l'étage diffuse de nouveau cette lumière sur la coque interne de sa voûte ; la dernière travée, proche de la nef, est à l'étage des

**FIG. A-25 : Sainte-Sophie, vue perspective.**

Les quatre contreforts des arcs soutenant le dôme apparaissent sur les façades sud et nord ; dans l'axe est-ouest la silhouette du bâtiment résulte de l'étagement des demi-dômes qui contrebutent les arcs principaux (voir aussi fig. A-31).

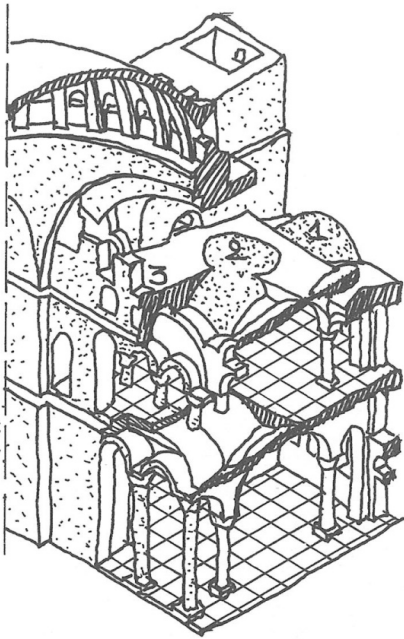


lor à profusion, d'insoutenable rayons sautant au visage des hommes. On croirait voir le soleil de Midi à la saison du printemps, lorsqu'il dore tous les sommets<sup>8</sup>. » Procope ne dit pas autre chose : « On dirait que l'espace n'est pas éclairé de l'extérieur mais que l'éclat émane de l'intérieur<sup>9</sup>. » Il faut revenir au choc visuel que rapporte Procope et s'interroger sur les conditions architecturales rendant possible une telle inversion de la traversée apparente de la lumière dans un bâtiment, c'est-à-dire du dedans vers le dehors. Pour cela il faudrait d'abord que l'éclat central intérieur soit apparemment plus intense que la source naturelle, extérieure évidemment. Cela suppose que la calotte du dôme fasse pour ainsi dire oublier la source qui l'éclaire. La solution, là encore particulièrement audacieuse, permet d'envisager une telle possibilité. Quarante petites ouvertures pratiquées dans l'assise du dôme créent un anneau lumineux ininterrompu. Un chapelot d'ouvertures séparées par de minces trumeaux (de l'épaisseur des nervures rayonnantes du dôme (fig. A-20)) et la réverbération lumineuse sur les mosaïques de la calotte devaient produire un éclat presque uniforme venant d'une myriade de scintillements ponctuels. Par ailleurs, l'habitude byzantine d'obturer les fenêtres à l'aide de minces feuilles d'albâtre jaune devait adoucir la gêne éventuelle d'un contre-jour<sup>10</sup> derrière les ouvertures. Plus généralement, les élévations montrent que dans les parties hautes du sanctuaire, de nombreuses ouvertures étroites ont été mêlées au scintillement des mosaïques tandis que les baies de grandes dimensions sont réservées aux parties

tribunes couverte d'une voûte en berceau parallèle à la nef et qui, de ce fait, reçoit difficilement la lumière de la travée voisine, l'arête délimitant ainsi une ligne d'ombre très présente entre la nef et les galeries (fig. A-28, 29). Ce qui est accentué, à l'étage comme au rez-de-chaussée, par le rapprochement des colonnes donnant sur la nef (et l'obstacle de la retombée des arcs comme on peut le vérifier sur l'axonométrie renversée) par rapport à l'intervalle qui les sépare dans les travées. L'ensemble de ce dispositif sépare la lumière de la nef de celle des côtés. Tandis que la coupole et son éclat renvoie au centre, les centaines d'ouvertures de la périphérie<sup>11</sup> (fig. A-24, 25) forment un anneau étincelant qui donne toute l'ampleur du rayonnement. L'inversion apparente de la provenance de la lumière qui avait émerveillé Procope provenait certainement autant de l'éclat doré du dôme, du clair-obscur des galeries que du scintillement de myriades d'ouvertures participant, jusqu'à la plus reculée, et comme résiduellement, du scintillement central.

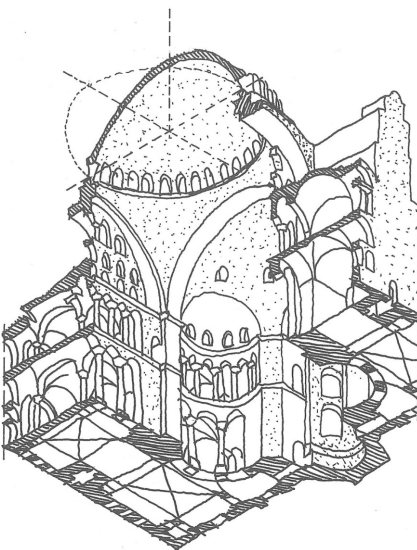
**FIG. A-28 :** Sainte-Sophie, détail.

Sur toute la paroi externe, sept niveaux de percements sont partout visibles. En bas, grandes baies percées à contre-jour derrière les galeries. En haut nombreuses petites ouvertures percées directement dans la coque des dômes. La lumière latérale ne contamine pas la lumière centrale rayonnante.



**FIG. A-29 :** Sainte-Sophie, axonométrie.

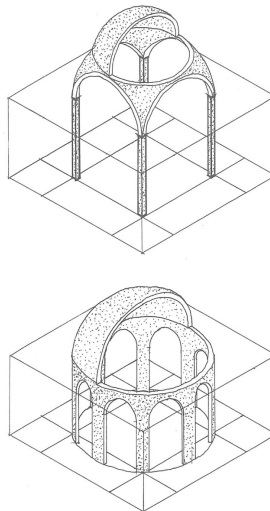
La lumière latérale est perçue à travers les galeries. Par les grandes baies le jour pénètre, franchit une première travée couverte d'un berceau transversal qui achemine la lumière jusqu'aux voûtes sphériques (à l'étage) et d'arêtes (à rez-de-chaussée) de la travée centrale. La galerie proche de la nef est couverte d'un étroit berceau longitudinal qui stoppe la lumière [d'après Choisy].



Analyse Saint-Sophie, réf. 23, pp 27-33

### La structure de l'église et le dôme sur pendentifs

La mise au point du dôme sur pendentifs permet de résoudre la difficulté spatiale de Sainte-Sophie : ouvrir largement l'espace contenu sous un dôme à des galeries qui l'entourent. Habituellement porté par un cylindre ou un dérivé polygonal en maçonnerie (un octogone bien souvent) le dôme se prolongeait donc vers le sol par ce tambour plein que l'on savait éventuellement ouvrir sur son pourtour par une série d'arcatures (fig. A-32). San Vitale de Ravenne illustre parfaitement cette technique courante dont on devine les limites en confrontant le plan et la coupe : retombée des arcs, épaisseur des piliers, et multiplication de ceux-ci pouvant obstruer considérablement les relations du centre et de la périphérie,



**FIG. A-32 :** Dôme sur tambour et sur pendentifs.  
Comparaison des relations fonctionnelles et visuelles entre le centre et la périphérie. Un dôme sur un plan d'assise carré, un dôme sur cylindre.

notamment dans le cas de grands dômes (fig. A-6). En effet, plus la portée du dôme s'étend, plus le tambour de soutien s'épaissit et plus les liaisons du centre avec son anneau de galeries tendent à se refermer visuellement.

Le dôme sur pendentifs permet de se passer tout simplement du tambour de soutènement en appuyant la base du dôme sur un anneau de maçonnerie renforcée reposant lui-même sur le sommet de quatre arcs portés et contreboutés par quatre piliers massifs (fig. A-30, 31). Le passage du plan circulaire de la base du dôme au plan carré des quatre piliers représentait une difficulté en soi. Cette difficulté explique pourquoi jusque-là la géométrie polygonale ou cylindrique était préférée car il est plus aisé de raccorder un cercle et un octogone qu'un cercle et un carré. L'octogone qui soutient le dôme de San Vitale de Ravenne illustre une fois de plus la solution jusque-là usitée : au-dessus de chaque angle de l'octogone, de petites voûtes en cul-de-four surmontées d'un arc, qu'on appelle « trompes », relie la base du dôme au sommet de l'octogone (fig. A-6). Lorsque seuls quatre piliers soutiennent le dôme, le plan circulaire de l'assise du dôme se rattache peu à peu au plan carré le long de triangles courbes, s'élevant entre les arcs, qu'on appelle « pendentifs » bien visibles sur l'axonométrie renversée (fig. A-29).

Toute la structure de l'édifice découle ensuite de la dissymétrie des massifs de butée des quatre arcs principaux (dont on a déjà expliqué les motifs<sup>12</sup>). On peut en décomposer les éléments (fig. A-30) : dans l'axe est-ouest de la nef une cascade de voûtes et de demi-dômes absorbe les poussées latérales, tandis que dans l'axe nord-sud ce sont d'énormes piliers, creux comme on le voit sur le plan (fig. A-22) et très apparents à l'extérieur du bâtiment. La figure apprend aussi que tout l'extérieur de Sainte-Sophie est le résultat mécanique de son espace interne et de sa structure.

Mis au point pour satisfaire au gigantisme d'un sanctuaire et aux thèses solaires de l'exégèse théologique en vigueur à l'époque, le dôme sur pendentifs devint, par la suite, le lieu commun de la centralité des sanctuaires chrétiens, quelle que soit la dimension du bâtiment ou quel qu'en soit son plan.

12. La résistance à la compression pour les piliers et l'allègement du poids des dômes guidèrent la mise en œuvre des matériaux : « Anthemius, en bon ingénieur qu'il était, utilisa ses matériaux judicieusement. Il savait que les quatre piliers principaux et les quatre piliers secondaires auraient à porter le poids de la majeure partie de la structure et à résister à la poussée du dôme. Il les fit donc en granit, une pierre lourde et résistante. Les surfaces horizontales des blocs de granit furent soigneusement polies pour s'assurer que la pression que les blocs subiraient serait également répartie. Aux jointures critiques il inséra des feuilles de plomb entre les blocs de sorte que le contact soit parfait. Il utilisa également de la pierre, taillée en colonnes, pour porter les murs,

les demi-dômes et les voûtes latérales. Mais il fallut faire les voûtes, les demi-dômes et le grand dôme lui-même aussi légers que possible de manière à réduire leur poids et les efforts qui ne manqueraient pas de se transmettre aux piliers et aux colonnes. Ils furent donc édifiés en briques byzantines, d'environ 45 cm<sup>3</sup> sur 5 cm d'épaisseur. Ces briques furent scellées à la chaux, matériau qui, progressivement, durcit comme la brique elle-même et efface toutes les imperfections entre elles. Il fit bâtir d'énormes échafaudages de bois pour porter les arcs, les voûtes et les dômes pendant la construction, jusqu'à ce que le mortier durcisse et les lie en une structure presque monolithique. » Mario Salvadori, *Why Buildings stand up ?*, New York, Norton, 1990, pp. 252 sq.

**FIG. A-30-31 :** Sainte-Sophie, structure.

Un dôme sur un plan d'assise carré, un dôme sur pendentifs. Le plan circulaire du dôme se rattache au plan carré des piliers par l'intermédiaire des pendentifs. L'anneau de cerclage nervuré et les arcs forment un ensemble monolithique qui transmettent latéralement et verticalement les poussées du dôme. On notera les deux méthodes de contreboutements des grands arcs, à l'est et à l'ouest, dans le sens de la nef par des demi-dômes, au nord et au sud par des contreforts massifs et visibles à l'extérieur du bâtiment.

