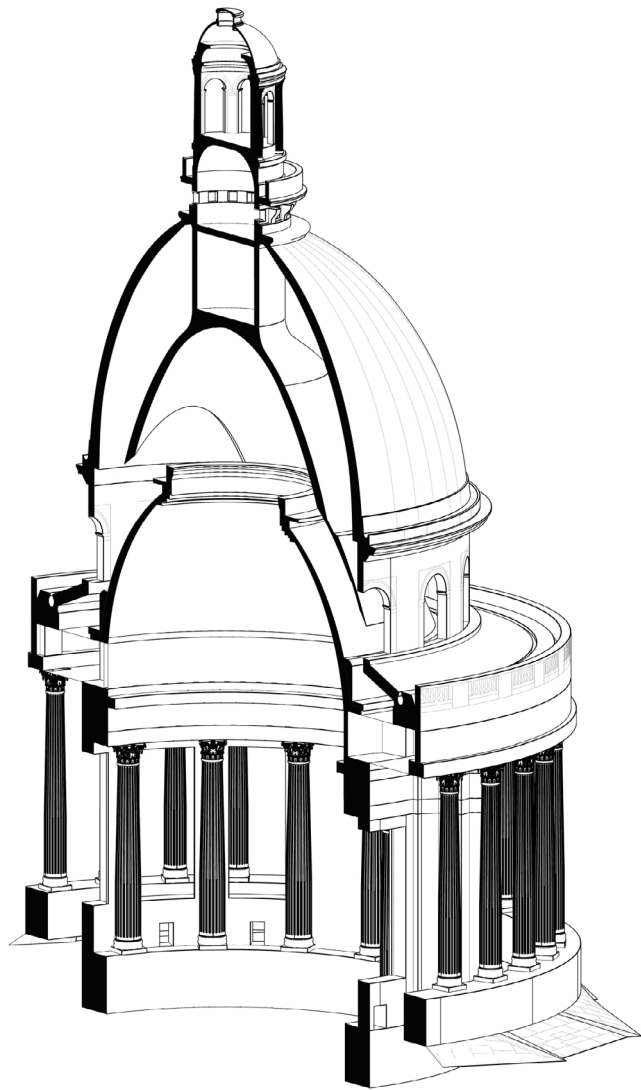


**La cúpula del Panteón francés.  
Geometría y piedra armada.**



Carlota López de Vicuña de Jorge



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

**Carlota López de Vicuña de Jorge**

*La cúpula del Panteón francés.  
Geometría y piedra armada.*

LA CÚPULA DEL PANTEÓN FRANCÉS.  
GEOMETRÍA Y PIEDRA ARMADA.

*Estudiante*

Carlota López de Vicuña de Jorge

*Tutor*

Santiago Huerta Fernández

Departamento de Estructuras y Física de Edificación

*Aula TFG 5*

María Barbero Liñán, *coordinadora*

José Antonio Flores Soto, *adjunto*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

# Índice

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. MARCO HISTÓRICO

- 1.1. La Sainte-Geneviève de Soufflot
- 1.2. Debate sobre la seguridad

2. GEOMETRÍA

- 2.1. Influencias anteriores: cúpulas dobles y triples
- 2.2. La cúpula de Rondelet
- 2.3. Análisis y volumetría de la cúpula
- 2.4. Cálculo de estabilidad

3. PIEDRA ARMADA Y SISTEMA CONSTRUCTIVO

- 3.1. Antecedentes y ejemplos previos
- 3.2. Proceso constructivo
- 3.3. Localización del hierro en la cúpula
- 3.4. Problemas por el uso del material

CONCLUSIONES

FUENTES

- Bibliografía y recursos digitales
- Procedencia de las ilustraciones



# Resumen

El Panteón de París puede considerarse la obra más importante del siglo XVIII, tanto por la envergadura del mismo como por el debate que suscitó el límite al que se llevaron sus proporciones y su técnica constructiva.

Está claro que fue la primera vez en la que matemáticos, ingenieros y arquitectos pudieron aplicar sus teorías en un caso real antes de su construcción. Esto motivó el interés por desarrollar la teoría de estabilidad de las estructuras abovedadas y de las cúpulas que, hasta entonces, se basaba en el estudio de geometrías y reglas de proporción.

Este trabajo puede considerarse una continuación de las cuestiones que se plantearon por entonces acerca de la estabilidad de la cúpula. Este tema se abordará; por un lado, analizando la geometría que se diseñó para la cúpula y por el otro, examinando los materiales que se emplearon.

A partir de la documentación recopilada se ha seguido un proceso de investigación con el objetivo de conocer en detalle la historia, los proyectos y los distintos cambios que ha sufrido la cúpula a lo largo de su construcción.

Con ello, surge la pregunta de si las elecciones y determinaciones que se tomaron fueron las adecuadas. El conocimiento que se tiene ahora acerca de la teoría del análisis límite de las estructuras de fábrica nos da las herramientas para simplificar el problema a un enfoque de equilibrio y aportar claridad al asunto. Los problemas que han surgido con el paso del tiempo relativos a la combinación de la piedra y el hierro también nos permite sacar conclusiones.

## PALABRAS CLAVE

Panteón francés · Iglesia de Sainte-Geneviève · Soufflot · Rondelet · Piedra armada · Siglo XVIII



# Introducción

“ce sera le veritable chef d’ouvre de l’architecture française!... Elle présentera le premier modèle de la parfait architecture!” (será la verdadera obra maestra de la arquitectura francesa... Presentará el primer modelo de arquitectura perfecta).

Abad Laugier, 1760.

Desde que se decretó la construcción del Panteón de París hubo una gran expectación por la que sería la nueva Iglesia de Sainte-Geneviève.

Me detendré bastante en conocer su historia, ya que es clave para entender la evolución y los cambios que sufrió durante toda su fase de construcción. Su arquitecto Soufflot diseñó hasta cinco proyectos distintos, promovido en gran parte por la presión a la que estaba sometido debido a las dimensiones tan pequeñas que había diseñado para los pilares que debían soportar la futura cúpula. Es un contexto de mucho debate y polémicas que, sin lugar a duda, dejó un legado muy importante para el desarrollo de la teoría de estructuras abovedadas.

La cúpula se estudió una y otra vez y se comparó con otras cúpulas dobles y triples de escalas relativamente parecidas que ya se habían construido. Con esto se buscaba determinar si los soportes aguantarían el peso y los empujes de la cúpula.

Soufflot muere sin ver terminada la cúpula, pero Rondelet mantendrá su diseño e intereses. Además, escribe una memoria detallando en profundidad la construcción que se llevará a cabo. A partir de esta documentación me centro en estudiar la geometría y volumetría de la cúpula para así analizar la estabilidad de ésta a partir de la teoría del análisis límite de estructuras de fábrica desarrollado por el profesor Heyman.

Una vez entendida la cuestión desde el punto de vista de la geometría y de las proporciones que se tuvieron en cuenta para el diseño de la cúpula se aborda el tema del sistema técnico-constructivo. Veremos que el afán de Rondelet por introducir hierro en la mampostería no tiene límite, es más lo lleva a extremos hasta nunca vistos.

Esta idea no surge por iniciativa propia, es cierto que el hierro venía empleándose desde la antigüedad como elemento auxiliar pero el proyecto para la columnata del Louvre, así como otros ejemplos influyen en Soufflot y Rondelet.

Incidiré a continuación en un aspecto más técnico, explicando el proceso constructivo con los sistemas de grúa que se diseñaron, los ensayos de resistencia a compresión que se realizaron en las piedras o los hierros que se colocaron aquí y allá. Este aspecto lo detallaré más adelante, con la localización de los hierros según un plano dibujado por Rondelet en el que se aprecia el desconocimiento que había por su parte en el comportamiento de la fábrica y de los tirantes.

Por último, me detendré en las consecuencias que han ocasionado a largo plazo los refuerzos metálicos en la mampostería del monumento por las propiedades físicas que tiene el hierro.





# 1 Marco histórico

## 1.1 La Sainte-Geneviève de Soufflot

### Antecedentes

El Panteón francés que conocemos actualmente se planteó en sus inicios como la Iglesia de Sainte-Geneviève. Ésta ocupó durante unos 25 años la mente de su arquitecto Jacques Germain Soufflot (1713-1780), desde 1755 hasta el año de su muerte.

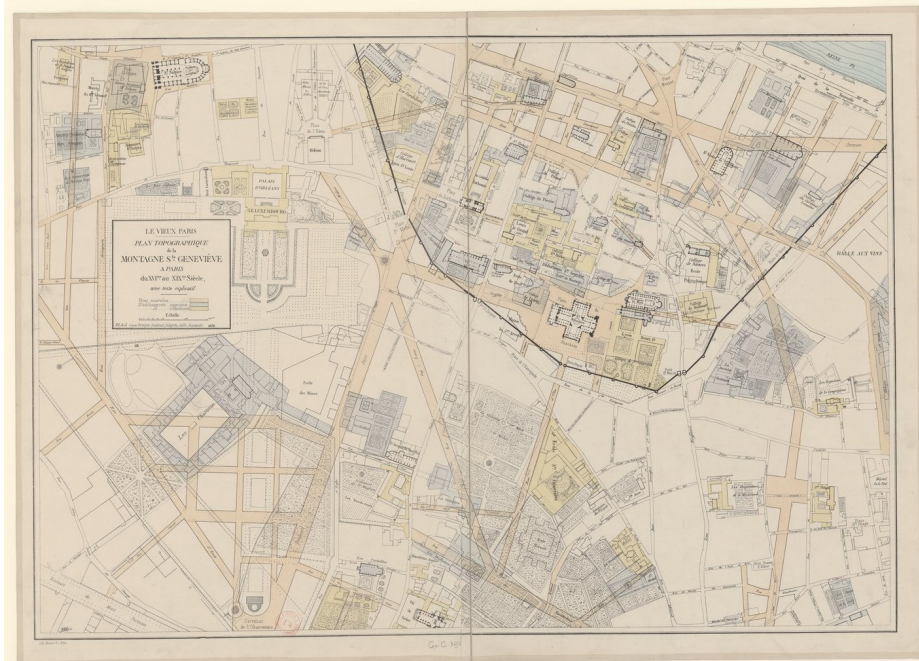
Esta nueva iglesia surgió como una promesa por parte del rey Luis XV. En agosto de 1744, durante la Guerra de Sucesión Austriaca, el rey enfermó gravemente. Temió por su vida y rezó a Sainte-Geneviève, la patrona de París, para su recuperación. Tres meses más tarde, tras recuperar su salud, el rey visitó la antigua abadía junto con la reina y su familia para agradecer a Santa Genoveva y prometerles a los monjes que se encontraban allí construir una nueva iglesia sobre los restos de la antigua (fig. 1), que durante mucho tiempo se consideró que necesitaba una renovación.



1.1. La vieja iglesia de Ste-Geneviève y St. Etienne (1807)

La Antigua Abadía se encontraba en una ubicación privilegiada, se situaba en lo alto de una colina que había cerca de la orilla del río Sena, junto con otra pequeña iglesia llamada Saint-Étienne-du-Mont. En el *Plan topographique de la montagne Ste-Geneviève* dibujado en 1874 (fig. 2) se entiende perfectamente la relación entre estas tres iglesias y el impacto que pro-

dujo tanto en la imagen de París como en la mentalidad de la época. La decisión de construir la nueva iglesia pronto se convirtió en una pieza de propaganda para la corona francesa, que dio un vuelco interesante a lo largo de su historia producido por la evolución de los regímenes políticos.

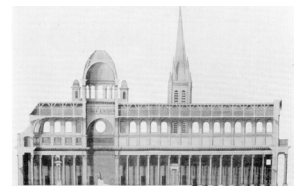


1.2. *Le vieux Paris - Plan topographique de la montagne de Ste-Geneviève à Paris*

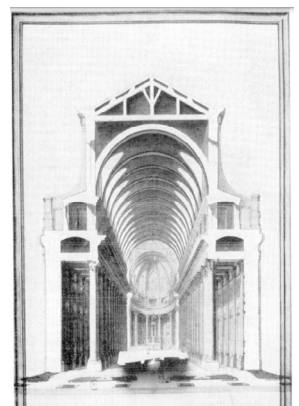
Hacia tiempo que los monjes de la abadía reclamaban una renovación. En 1670, unos 75 años antes de la promesa del rey, ya se había planteado un proyecto para su reconstrucción, ya que el estado en el que se encontraba era bastante malo. Claude Perrault y su hermano Charles elaboraron un diseño inusual, de planta alargada y estrecha, con una nave soportada por columnas de orden corintio y una bóveda continua que cerraba el espacio (figs 3 y 4). Pero nada se hizo entonces y nada tuvo que ver el proyecto que planteó posteriormente Soufflot.

A pesar de la promesa de Luis XV, no fue hasta 1755 cuando por fin se decretó la construcción de Sainte-Geneviève. Un mes después, en enero de ese mismo año, Soufflot recibió el encargo para construir el edificio más importante del reinado, la nueva iglesia dedicada a Sainte-Geneviève de París. Ange-Jacques Gabriel, como primer arquitecto del rey y rival de Soufflot, reflejó su rechazo al no ser elegido para construir la iglesia. Gabriel se benefició directamente de la protección del rey, que defendía su obra como modelo a imitar. El Marqués de Marigny, como *Directeur des bâtiments du Roi* y amigo de Soufflot, desestimó sus reclamaciones en una carta. No había ninguna duda, desde el punto de vista de Marigny, de que Soufflot era la elección apropiada. Juntos se esforzaron por llevar a buen puerto una reforma arquitectónica que modernizara París, a la que Luis XV mostró poco interés.

Soufflot se dedicó entonces a diseñar una arquitectura que recordara el peso y la dignidad del reinado de Luis XV, en contraposición a la frivolidad de la arquitectura de la regencia.



1.3. *Sección longitudinal del Proyecto de Claude Perrault para la iglesia de Ste-Geneviève (1670)*



1.4. *Sección transversal del Proyecto de Claude Perrault para la iglesia de Ste-Geneviève (1670)*



1.5. Retrato de Jacques Germain Soufflot (1767)

## Influencia de la arquitectura gótica

Soufflot escribió en 1741 su *Mémoire sur l'architecture gothique*, una de las obras más importantes que presentó a la Academia de Lyon. Esta importancia no se debe tanto a la originalidad de su contenido sino al impacto que tuvo esta arquitectura en él. Da testimonio de la longevidad de las ideas que se concretaron diez o veinte años más tarde en la construcción de Sainte-Genève.

Aunque es de apariencia clásica, su iglesia evocaba efectos espaciales góticos. Podría pensarse que tal ideal es imposible de alcanzar, ya que tanto los sistemas clásico y gótico como su estética y construcción son opuestos. Sin embargo, Soufflot estaba decidido y trató de plasmar en su proyecto esa ligereza constructiva que tanto le interesaba.

En esta memoria Soufflot citó algunas de las iglesias góticas que vio en sus distintos viajes y atacó el mal gusto de los ornamentos góticos. Es por eso por lo que consideraba las fachadas góticas muy inferiores con respecto a las fachadas modernas. En contraposición, consideraba que las iglesias modernas habían adoptado simplemente el enfoque general de las iglesias góticas, y en particular su planta. Alegaba que no debía negarse la arquitectura gótica, ya que en ese sentido había que considerarla como nuestra maestra:

“Si, en comparaison avec ceux des églises gothiques, les piliers et les voûtes des églises modernes apparaissent un peu lourds, c'est que la construction gothique est plus ingénieuse, plus hardie et même plus difficile que celle des églises modernes. Les églises gothiques sont plus élancées que les modernes: ainsi se repose la question des proportions ”.<sup>1</sup>

(Si, en comparación con las iglesias góticas, los pilares y las bóvedas de las iglesias modernas parecen un poco pesados, es porque la construcción gótica es más ingeniosa, más audaz e incluso más difícil que la de las iglesias modernas. Las iglesias góticas son más esbeltas que las modernas: esto plantea la cuestión de las proporciones).

En 1753 el Abad Laugier publicó su *Essai sur l'architecture*, el libro que más influyó en la evolución de la arquitectura en Francia, e incluso en toda Europa en esos años. En él formuló los principios arquitectónicos referentes a la “pequeña cabaña rústica”, pero la sección del libro que más le interesaba a Soufflot era el capítulo dedicado al diseño de la iglesia. El objetivo de Laugier era una arquitectura de formas clásicas simplificadas y ortogonales, pero profundamente influenciada por el gótico. Por consiguiente, se vio llevado a proponer una iglesia gótica en su efecto, pero clásica en su forma:

“J'ai cherché si en bâtissant nos églises dans le bon goût de l'architecture antique, il n'y aurait pas moyen de leur donner une

1. Jacques Germain Soufflot en su *Mémoire sur l'architecture gothique*, 1741.

2. El Abad Laugier en su *Essai sur l'architecture*, 1753.

élévation et une légèreté, qui égalât celle de nos belles églises gothiques”.<sup>2</sup>

(Intenté averiguar si, construyendo nuestras iglesias con el buen gusto de la arquitectura antigua, no habría manera de darles una elevación y una ligereza iguales a las de nuestras hermosas iglesias góticas).

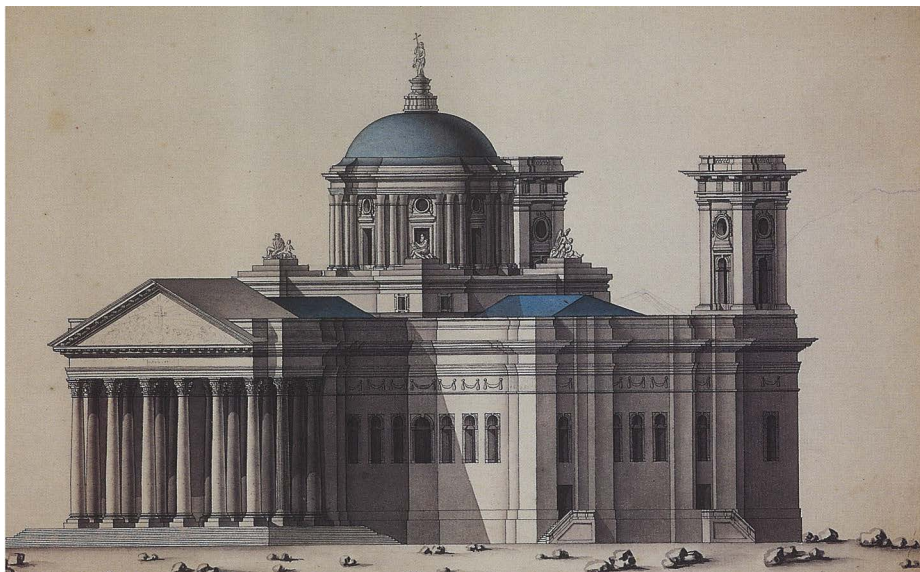
Está claro que este texto tuvo un gran impacto en Soufflot, si bien es cierto, probablemente Laugier fue inspirado primero por Soufflot; él estuvo en el colegio jesuita en Lyon en 1741 cuando Soufflot leyó a la Academia su memoria sobre la arquitectura gótica.

## Proyectos de Soufflot

### *Primer proyecto*

El primer proyecto diseñado para la iglesia de Sainte-Geneviève probablemente se situaría entre 1755 y 1756. Se encontraron unos planos no datados que podrían ser anteriores al aprobado en 1757. En esta primera idea ya se pueden apreciar los intereses que perseguía Soufflot de la planta centralizada cubierta en su espacio central por una cúpula. Se intuye ese objetivo de apariencia clásica.

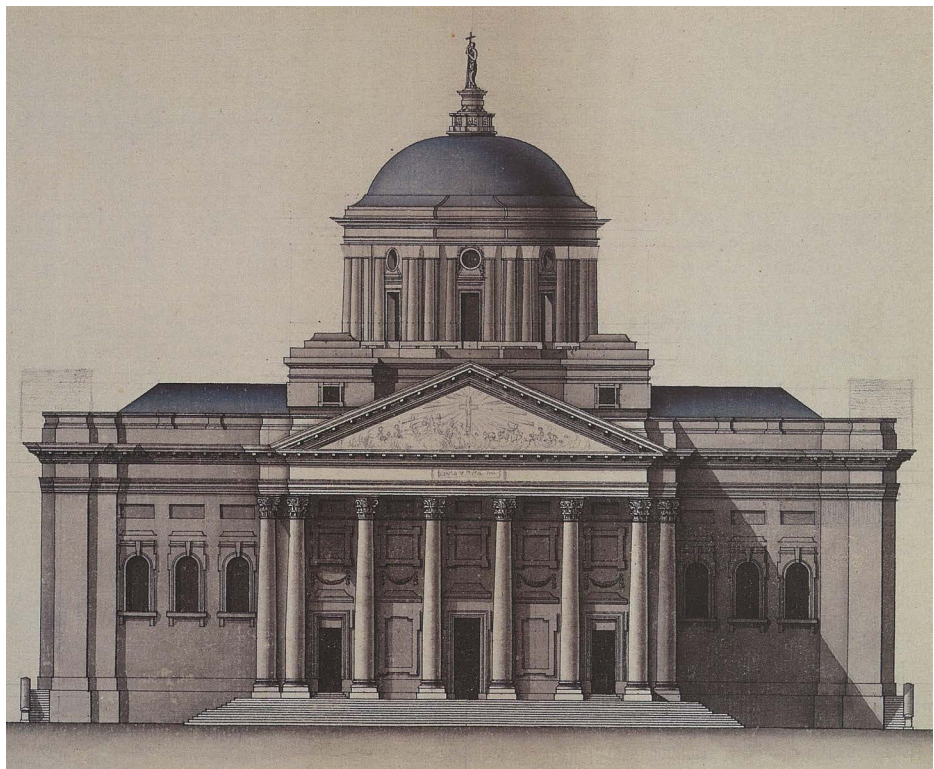
Es cierto que el diseño de la cúpula es todavía bastante elemental, ya que apenas se ocupa de la relación y el encuentro entre ésta y su base. También observamos varias diferencias en los detalles de los tres dibujos, que son variantes del mismo proyecto. La diferencia quizás más destacable entre los tres planos y que no corresponden entre ellos es la presencia de unas torres en uno de los brazos de la cruz, concretamente en el ábside.



1.6. Primer proyecto de Soufflot - Vista (no datado)



1.7. Primer proyecto de Soufflot  
- Sección (no datado)



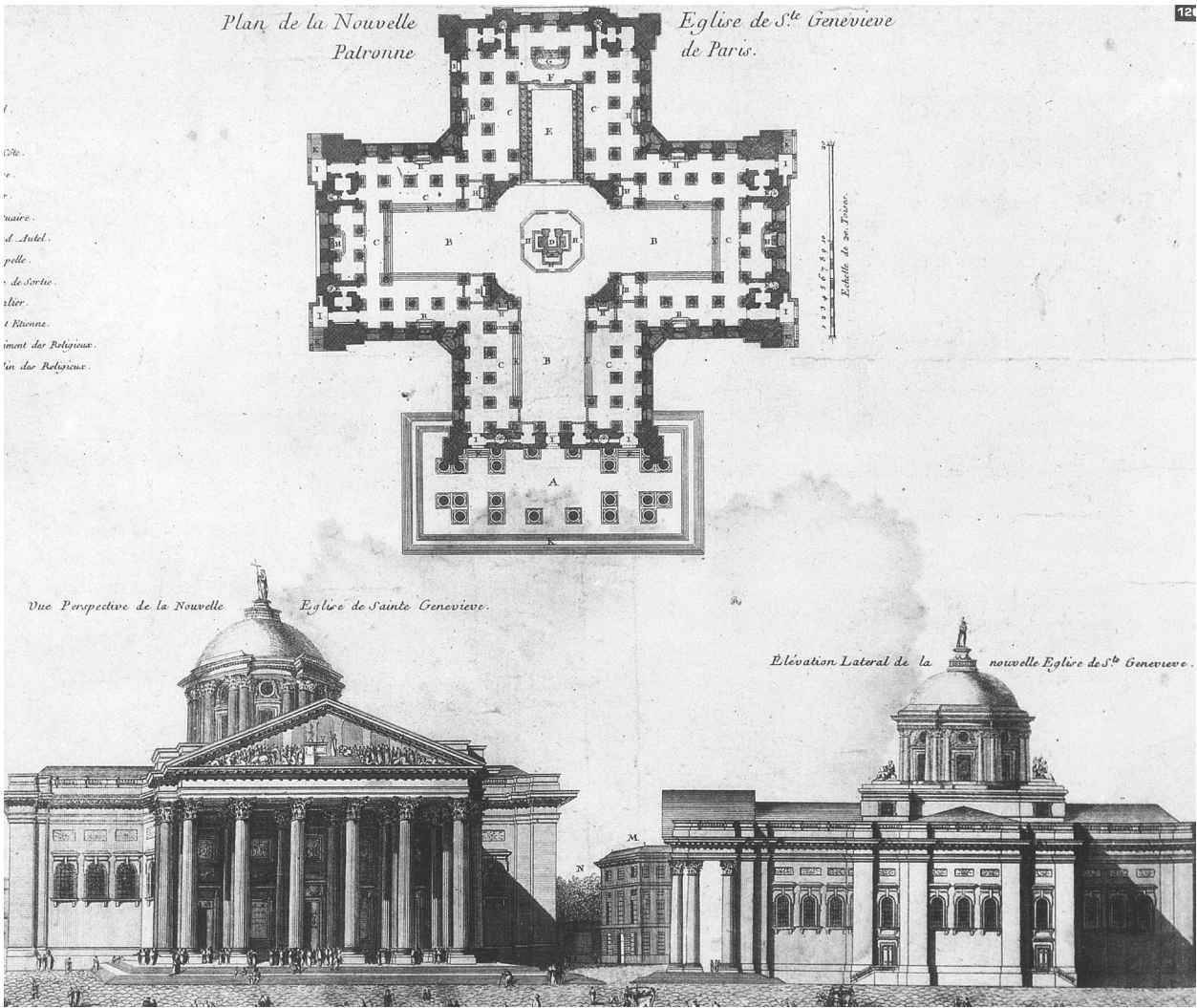
1.8. Primer proyecto de  
Soufflot - Alzado (no datado)

*Proyecto de 1757*

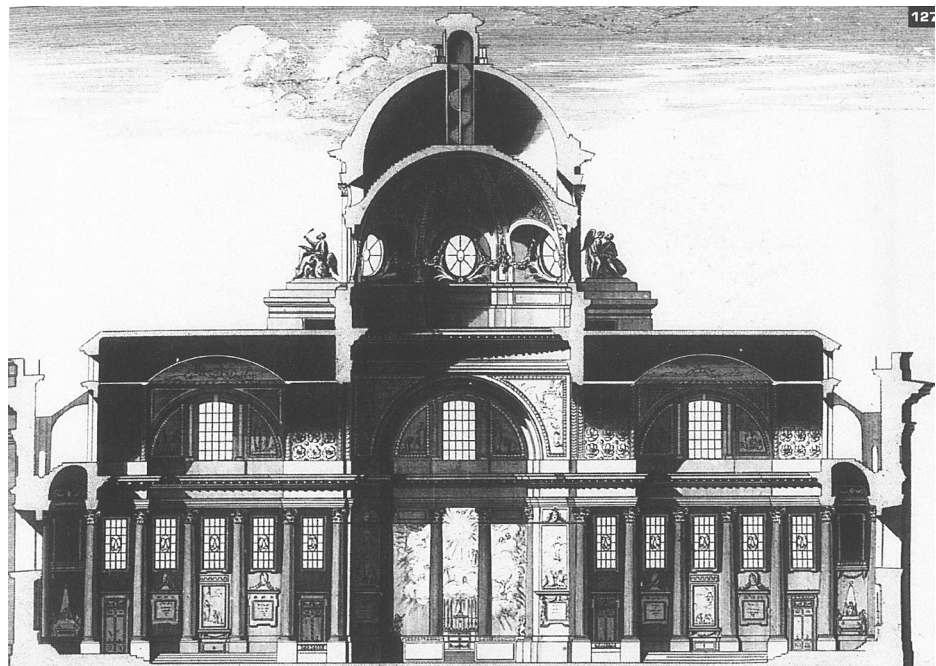
En este mismo momento Soufflot estaba involucrado en el proyecto de los Campos Elíseos, pero su tarea principal seguía siendo Sainte-Geneviève y continuó dándole vueltas a sus diseños. Sus planos fueron aprobados por el rey el 2 de marzo de 1757, fueron grabados de inmediato por Charles Bellicard en seis hojas- un plano de emplazamiento, una planta, dos alzados, una sección y una vista perspectiva. Poco después se grabó otra serie, al parecer una reelaboración de la de Bellicard, por Charpentier. Al igual que en el proyecto previo que se diseñó la planta era de cruz griega, reflejando adecuadamente los objetivos políticos y religiosos del rey. En el centro, con gran protagonismo, se encuentra la cúpula. Una cúpula de ladrillo o piedra de doble piel, nervada y artesonada, perforada por ventanas ovaladas cubiertas de guirnaldas que domina el conjunto.

La riqueza de la experiencia espacial no tenía precedentes en la arquitectura francesa, el proyecto de Soufflot es una proeza. Ya se muestra por su parte el interés por la ligereza constructiva del gótico. Aunque no se aprecia nada gótico en este diseño inicial, ya había en las filas seriadas de columnas algo de los ritmos espaciales de la catedral gótica. Sin embargo, no intentó adoptar la proporción  $1:2\frac{1}{2}$  o 3, que había deducido de la medición de las iglesias góticas; la sección de la nave de Sainte-Geneviève es de 1:1. Muchas cosas cambiaron en los años siguientes. Incluso en los primeros grabados se aprecian torpezas e incertidumbres. Las ventanas son rectangulares en el interior y de medio punto en el alzado; los óculos de la cúpula se transforman en ventanas ciegas en el exterior.

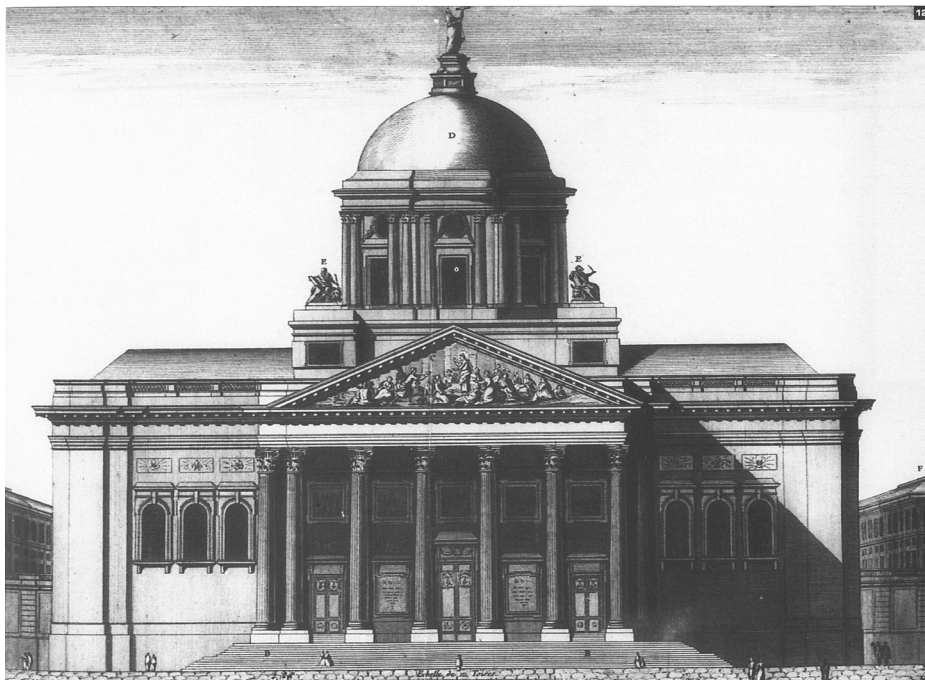
El terreno se consagró el 1 de abril de 1758 y, a pesar de las dificultades económicas por parte de la monarquía para financiar el proyecto las obras se pusieron en marcha y prosiguieron con buen ritmo. Durante esta fase se descubrió que el lugar donde se iban a erigir los cimientos de la nueva construcción estaba lleno de pozos de arcilla que descendían hasta 50 metros. Hubo que consolidar el terreno. La cripta y el sótano, que no eran más que un pequeño espacio bajo el coro para enterrar a los genoveses, se ampliaron considerablemente para dar consistencia y estabilidad a los cimientos. El tamaño de la iglesia se redujo en consecuencia. Las proporciones de las columnas tanto interiores como exteriores se ajustaron con sumo cuidado para garantizar una mayor solidez en apariencia.



1.9. Proyecto de Soufflot de 1756-1757, grabado por Charpentier



1.10. Proyecto de Soufflot de 1757 - Sección, grabado por Charpentier



1.11. Proyecto de Soufflot de 1757 - Alzado, grabado por Charpentier

#### Proyecto de 1764

No fue hasta una década más tarde desde que el rey prometió la construcción de esta nueva iglesia cuando se colocó la primera piedra. El 6 de septiembre de 1764 se preparó una gran ceremonia, representada en el cuadro de De Machy. Se descubrió el programa propuesto para este gran acontecimiento entre los papeles de los *Bâtiments du Roi*. En efecto, según un informe de *Mercure de France* de octubre de 1764, el rey volvió a la abadía después de salir de la cripta para pasar una hora o más inspeccionando los dibujos de la nueva iglesia traídos por Soufflot y presentados por Marigny, el director de edificios del rey. También estaba allí un arquitecto llamado Julie-David Le Roy que elogió la concepción y la escala de sus pórticos, ya que fueron la primera evocación de una fachada de templo antiguo a gran

1.12. Cuadro de Pierre-Antoine De Machy representando la colocación de la primera piedra el 6 de septiembre de 1764

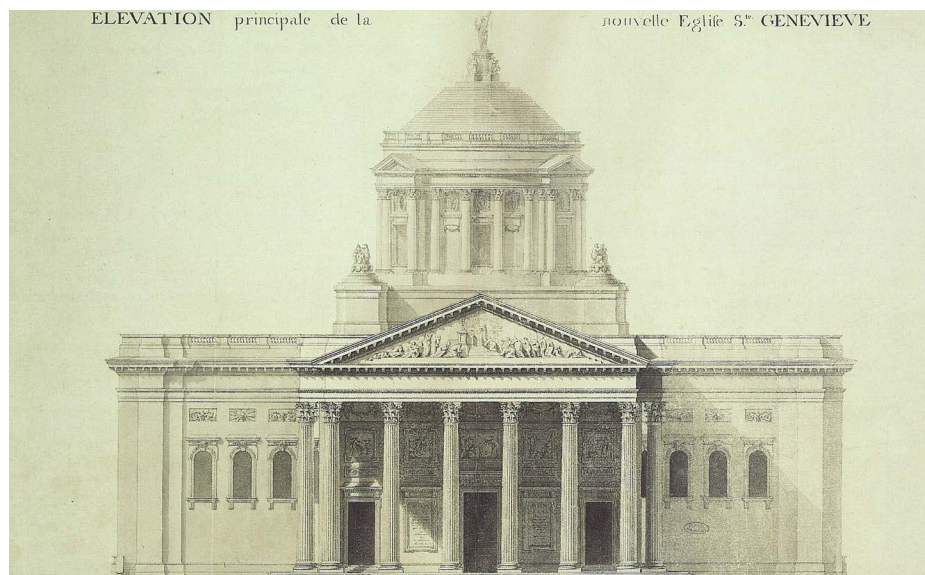


escala que se vio en Francia. En su opinión Sainte-Geneviève establecería el nuevo estándar de belleza para la arquitectura.

Aunque el diseño de la mayor parte del exterior no había cambiado mucho, la cúpula había sufrido grandes modificaciones. Se había agrandado considerablemente, con un anillo de columnas adosadas, rematado por una balaustrada y un gran cono escalonado. La cúpula central seguía estando formada por dos pieles de ladrillo o piedra, la interior acanalada y artesonada, perforada ahora con altas ventanas rectangulares en lugar de óculos. El interior se había vuelto más radiante y elegante.

Durante los cinco años siguientes, la construcción continuó sin cesar. Se levantaron los muros hasta la línea de cornisa y se erigieron las columnas y los pilares. Se conservan pocos dibujos de estos años, pero la decisión de cambiar el alzado de las ventanas debió de tomarse en este momento.

La nueva ligereza aparente en el diseño vino acompañada de los primeros intentos de determinar el tamaño de los soportes y el grosor de las bóvedas en relación con las luces.



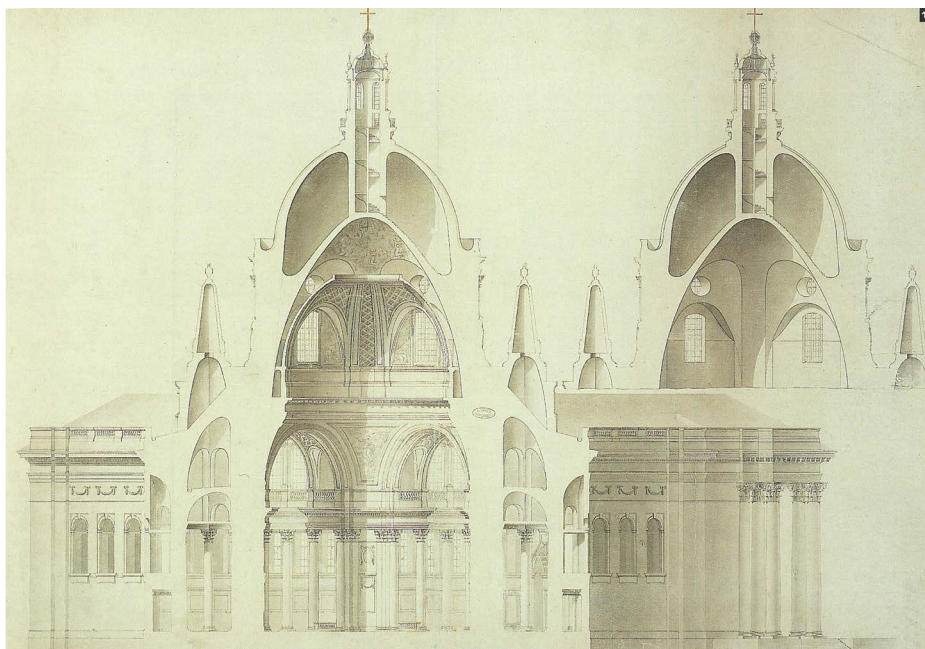
1.13. Proyecto de Soufflot de 1764- Alzado



1.14. Proyecto de Soufflot de 1764- Sección

*Proyecto de 1770*

La energía de Soufflot se dirigió en el año anterior a 1770 a repensar el diseño de toda la parte superior de la iglesia, para asegurar una nueva ligereza de expresión y dinamismo de la estructura. Es un momento en el que la figura de Gauthey, un ingeniero del que hablaré más adelante, provoca que Soufflot reconsidere la cuestión de la cúpula. Gauthey propuso una solución brillante y audaz. Sugirió que el peso de la cúpula no solo recayera sobre los cuatro grandes arcos que rodeaban el crucero, sino también sobre cuatro grandes arcos catenarios que se extendían sobre cada nave y se apoyaban en los muros exteriores de la iglesia. Soufflot aceptó el reto y diseñó esa imponente cúpula, que a pesar de sufrir ciertas modificaciones mantendría este sistema.



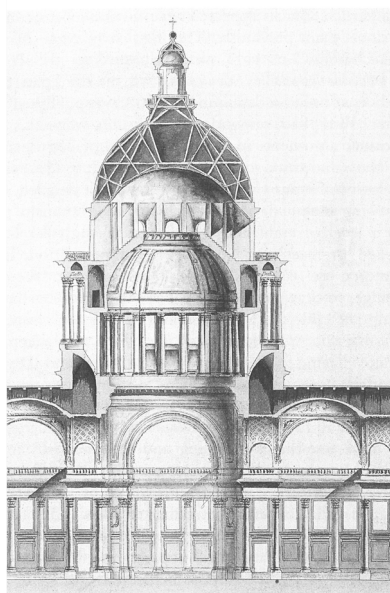
1.15. Proyecto de 1770 -  
Sección por la cúpula

*Proyecto de 1775*

A punto de comenzar la construcción de la cúpula central, Soufflot pensó en revisar de nuevo el diseño. En 1775, Rondelet, un arquitecto que trabajaba a su cargo, había preparado a petición suya un estudio comparativo de cúpulas. Era una memoria en la que había estudiado detalladamente las cúpulas del Panteón, de San Pedro, de San Pablo, la de los Inválidos y la de Val-de-Grâce, intentando determinar la relación exacta entre las superficies de apoyo y el peso de las cúpulas.

Ese mismo año, Soufflot diseñó una cúpula mucho más amplia, rodeada por una columnata de columnas exentas. La planta era octogonal, de modo que tramos enteros de la columnata se apoyaban directamente en los arcos

catenarios recién introducidos. También decidió rodear la cúpula con dieciséis columnas corintias, duplicando los arcos alrededor del crucero para proporcionar una base de apoyo más amplia. A principios de 1776, cuando se inició la construcción de los arcos transversales alrededor del crucero, ya se habían determinado estos conjuntos de columnas. Los arcos catenarios se iniciaron poco después, hacia finales de año. Aunque Soufflot había aumentado mucho la masa de mampostería, y también los medios para su sostenimiento, hubo algunas vacilaciones en su operación. La sección de la primera cúpula, diseñada en 1775 o 1776, tiene tres cúpulas separadas: la más interior, con un óculo, de ladrillo o piedra, y las dos exteriores, de yeso y madera, sostenidas por una armadura de madera.



1.16. Proyecto de Soufflot de 1775- Sección



1.17. Proyecto de Soufflot de 1775- Alzado

La cúpula octogonal fue sustituida más tarde, en 1776, por una columnata circular, aún no continua, con cuatro filas de columnas adelantadas y muros de refuerzo detrás. Pero al cabo de un año ya se había determinado el diseño de la cúpula que se iba a construir, claramente inspirada en la de San Pablo. Un anillo continuo de columnas exentas, que protegían cuatro torres de escaleras, formaba una galería abierta, rematada por una balaustrada, tras la cual se elevaba un ático que sostenía una cúpula revestida de cobre, rematada a su vez por una linterna y una cruz.

En el interior, otro anillo de dieciséis columnas corintias debía sostener una cúpula artesonada, abierta a través de un gran óculo a una cúpula parabólica diseñada para recibir un mural y también para servir de soporte a la linterna. Un tercer armazón formaría la cúpula exterior. Los tres armazones debían ser de piedra o ladrillo. La gran maqueta que registra el desarrollo de este diseño se comenzó sólo nueve años después. Sin embargo, incluso hasta el final, como muestra un boceto conservado, se consideró la posibilidad de utilizar cerchas de madera para formar una cúpula aún mayor, cuyo tejado curvo se extendía hasta la línea del extremo de la galería de columnas.

El andamiaje de los grandes arcos de soporte de la cúpula del crucero sufrió un golpe a finales de 1776. Aparecieron algunas grietas en los pilares de soporte, pero no parecía haber motivo de alarma. Durante 1777 los fondos se redujeron considerablemente y no se pudo iniciar ninguna nueva construcción. En el año siguiente, el andamiaje situado bajo los cuatro arcos catenarios destinados a sostener el tambor y la columnata exterior de la cúpula sufrió un golpe. Volvieron a aparecer grietas en la subestructura, más graves que antes. Soufflot, alarmado, se dio cuenta enseguida de que gran parte de las grietas se debían a las cuñas de madera que se habían colocado entre las piedras para garantizar la uniformidad de la unión. Inició una solución drástica, pero exitosa, arrancándolas de una a una, su intención era perforar toda la estructura por completo. Durante los próximos años la construcción se detuvo. Soufflot escribió cartas desesperadas al nuevo director de edificios del rey durante el verano de 1780, suplicando dinero para proceder con la cúpula. El 29 de agosto de 1780 Soufflot muere en su casa sin ver terminada su obra.

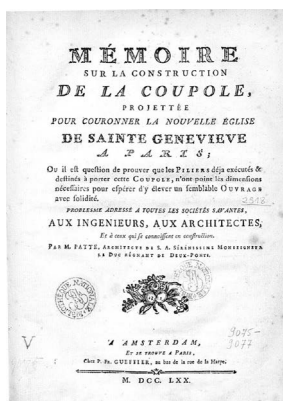
Tras la muerte de Soufflot, Maximilien Brébion es nombrado sucesor con Rondelet como uno de los inspectores. Se pidió a Brébion que presentara un informe. No ofreció más que propuestas, elaboradas durante dos visitas al lugar, de acuerdo con los inspectores y los contratistas, sobre el trabajo que debía realizarse en los meses siguientes para completar las bóvedas.

Rondelet también fue invitado a presentar un informe sobre la obra. Presentó un extenso memorándum, que incluía la mayor parte de su anterior "Refutación", una historia completa de la construcción hasta ese momento y una larga descripción de la cúpula que se iba a construir siguiendo las ideas de su maestro Soufflot.





## 1.2 Debate sobre la seguridad



1.18. Memoria de Patte de 1770

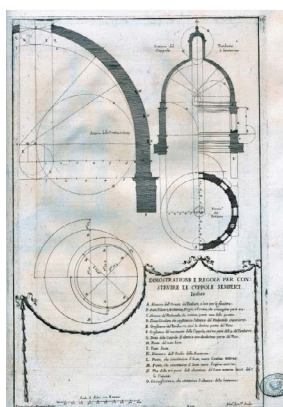
Podríamos afirmar que el siglo XVII marcó un antes y un después en el desarrollo de la teoría científica de la estabilidad de las estructuras abovedadas. En este contexto de gran interés por parte de ingenieros, matemáticos y arquitectos se produce un extenso debate poniendo en duda la estabilidad de la cúpula del Panteón francés. Es la primera vez que el conocimiento científico sobre las bóvedas y las cúpulas fue aplicado en un caso real antes de su construcción.

Soufflot no estaba muy interesado en las matemáticas y el cálculo, pero desde el principio se dio cuenta de que la iglesia que estaba diseñando exigía una ingeniería de un nuevo orden, basada en la experimentación y en un amplio conocimiento de la naturaleza de los materiales y, sobre todo, en el análisis matemático. Ya en junio de 1760 había tomado prestado de la Academia el célebre informe sobre las canteras de los alrededores de París. Y antes, había contrarrestado las críticas a la solidez de su estructura con estudios comparativos de otras iglesias de construcción ligera.

En la Edad Media, los maestros de obras de la arquitectura gótica basaban sus conocimientos en la experiencia acumulada y sabían que la estabilidad de una estructura de fábrica dependía exclusivamente de un enfoque de equilibrio, era independiente del tamaño. Las normas de diseño estructural que se aplicaban eran muy estrictas. Debían existir unas reglas que permanecían en secreto, está claro que no había ningún interés de transmitir este conocimiento.

En el siglo XVII Carlo Fontana trató de recopilar y sistematizar los datos obtenidos tras haber medido varias cúpulas en Roma junto con las proporciones que se habían escrito en algunos tratados. Fontana establece una regla para las cúpulas simples, clasificándolas según su disposición y tamaño. Proporciona distintas dimensiones para el tambor de la cúpula en función del material empleado en su construcción: para el ladrillo  $1/10$  de la luz y para la piedra un grosor ligeramente mayor,  $1/9$  de la luz. En el caso de las cúpulas dobles cada caso debería ser estudiado individualmente.

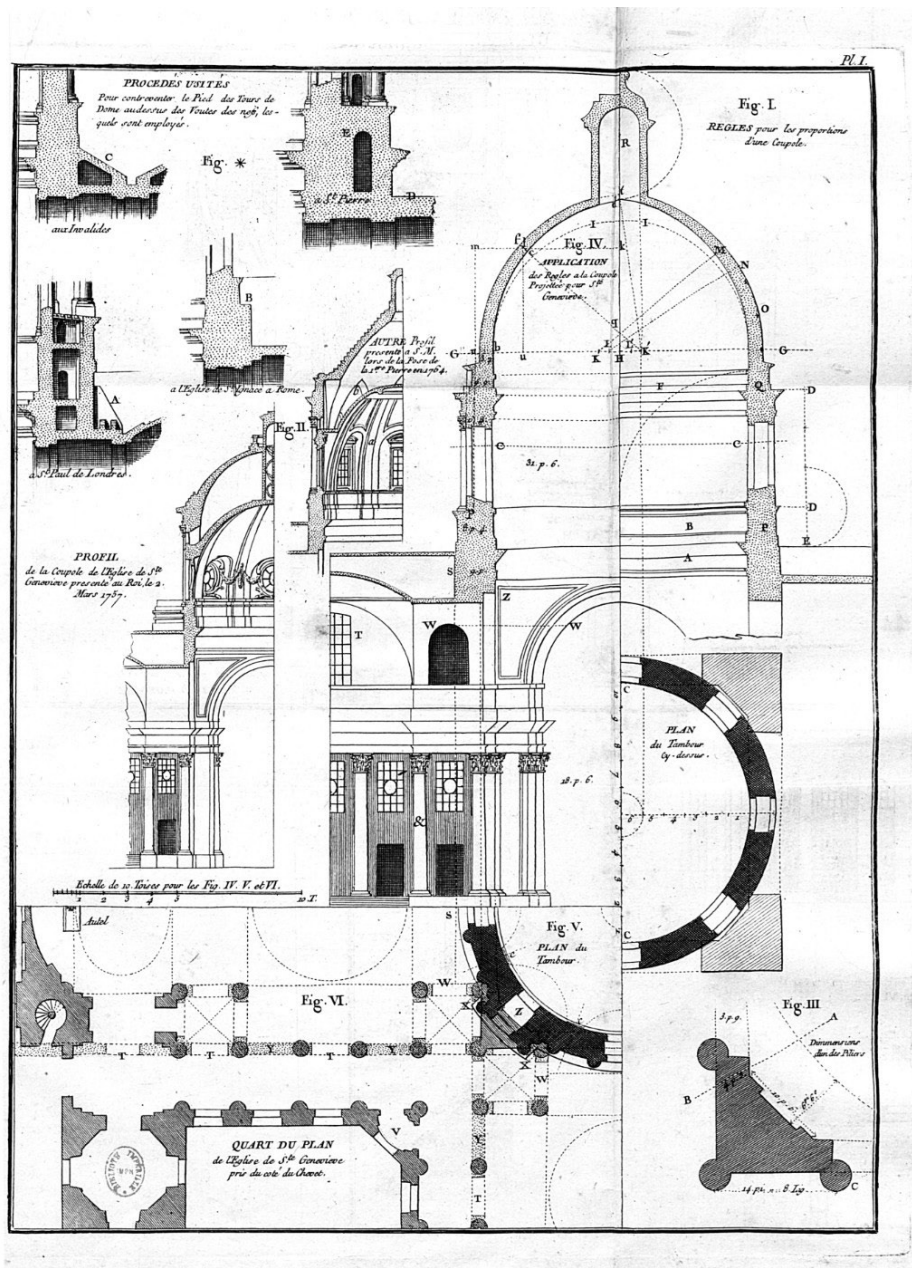
Como explicaba previamente, cuando comenzaron las obras se dieron cuenta de que el terreno era muy arcilloso y tuvieron que consolidarlo para comenzar con los cimientos de la iglesia. En 1768 los pilares que sostenían la cúpula de 20'5 metros de luz ya se habían construido de acuerdo al proyecto que Soufflot había diseñado. En 1770 aparece la figura de Pierre Patte, un arquitecto que da la alarma sobre el peligro que amenaza la estabilidad de la futura cúpula de Sainte-Geneviève. Patte escribe su *Mémoire sur la construction de la couple projetée de l'église Sainte-Geneviève* atacando la estructura de la iglesia y poniendo en duda el tamaño de sus soportes. Es el momento en que Jean Rondelet entra en la historia de Sainte Geneviève, que escribe una respuesta a la memoria de Patte en el que demostró sus habilidades a Soufflot y determinó su nombramiento como inspector en Sainte-Geneviève en diciembre de ese mismo año.



1.19. Reglas geométricas de Carlo Fontana (1694)

Soufflot se negó a responder al ataque de Patte, quien presentó una segunda versión, aún más despectiva a Marigny, el *Directeur des bâtiments du Roi*. Éste insistió en que Soufflot respondiera a las acusaciones. Así se inició la batalla. La disputa arquitectónica más célebre y, sin duda, la más importante del siglo estalló y se prolongó durante años.

A pesar de todo el revuelo suscitado por la Memoria de Patte, su análisis no se basaba en ninguna cúpula diseñada por Soufflot, ni siquiera en la más reciente de sus propuestas, que data de 1764. Patte conocía sin duda los planos de esta cúpula, pero había deducido sus dimensiones. Concibió e ilustró una cúpula de diseño propio, relacionada con el cruce que existía, pero más grande que cualquiera de las previstas por Soufflot.



1.20. Análisis de las dimensiones de la cúpula de la iglesia de Sainte Geneviève según Patte en su *Mémoire* (1770)

Abordó el cálculo del ancho del muro del tambor de la cúpula sobre pechinas según los principios de la mecánica y las reglas de proporción de fontana, que utilizó para comprobar la corrección de ambos métodos y añadir sus propias reglas para otros elementos de las cúpulas. Patte calculó que el diámetro de la cúpula de Sainte-Geneviève era de 19,2 m, por lo que su base debía medir 1,91-93 m.

La cúpula de Patte, además, era una sola cáscara de ladrillo, lo mínimo que, según él, Soufflot podía esperar construir. El objetivo de Patte, por supuesto, era demostrar que no se podía construir ninguna cúpula de importancia sobre los pilares que Soufflot había construido. Patte reconoció desde el principio que era posible calcular las estructuras antes de construirlas.

Patte ilustró los planos de las cúpulas de San Pedro en Roma, San Pablo en Londres, el Val-de-Grâce, la iglesia de la Sorbona, los Inválidos y Sainte-Geneviève, todas en relación con sus pilares de apoyo. También proporcionó una tabla con sus dimensiones clave. Confirmó que el grosor de la base de todas las cúpulas era aproximadamente la décima parte de su diámetro. Señaló que las cadenas de hierro podían aportar algo más de resistencia, pero no podían ser más que una solución a corto plazo, diseñada para soportar las cargas iniciales antes del asentamiento. No se podía confiar en el hierro a largo plazo.

El 12 de julio de 1770, un matemático francés llamado Charles Bossut leyó a los miembros de la Académie des Sciences la primera respuesta detallada a Patte. Bossut pretendía formular una teoría de las estructuras de las cúpulas. Comenzó por los sistemas de sustentación, refiriéndose a los trabajos de otros contemporáneos que abordaron el tema como Bernoulli, La Hire y Couplet, y relacionó sus fórmulas directamente con el diseño de Sainte-Geneviève. Es posible que Patte no conociera los detalles de la disposición de la cúpula de Soufflot, pero Bossut sí. Alegaba que no había nada que temer en cuanto a la resistencia de la cúpula.



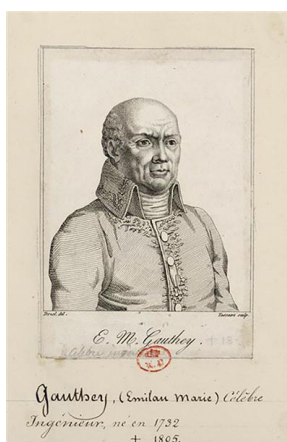
1.21. Retrato de Charles Bossut (1730-1814)

Patte, sin embargo, insistió, había utilizado las fórmulas de forma incoherente, a menudo incorrecta, e incluso cuando obtenía una cifra razonable, había decidido arbitrariamente duplicarla.

Rondelet y el ingeniero Émiland-Marie Gauthey serán los más firmes defensores de Soufflot. Según Gauthey, las cifras de Patte carecían de fundamento.

La refutación de Gauthey a las conclusiones de Patte es larga y detallada, e incluía muchos cálculos en notas a pie de página. Una y otra vez, subrayó el modo en que Patte había falseado los hechos. Insistió en que era muy ingenuo pensar que la cúpula estuviese sostenida únicamente por los cuatro pilares, en la medida en que es fácilmente demostrable que no hay ni una sola columna, ni un solo muro en todo el edificio que no contribuya a soportar su peso o a apuntalarla.

Al abordar la versión de Patte en la que proponía el uso de cadenas de hierro en las cúpulas, Gauthey hace una observación reveladora, de consecuencias para el futuro. Manifestó que una vez que el mortero se hubiese secado y la estructura se hubiese asentado, las cadenas ya no serían neces-

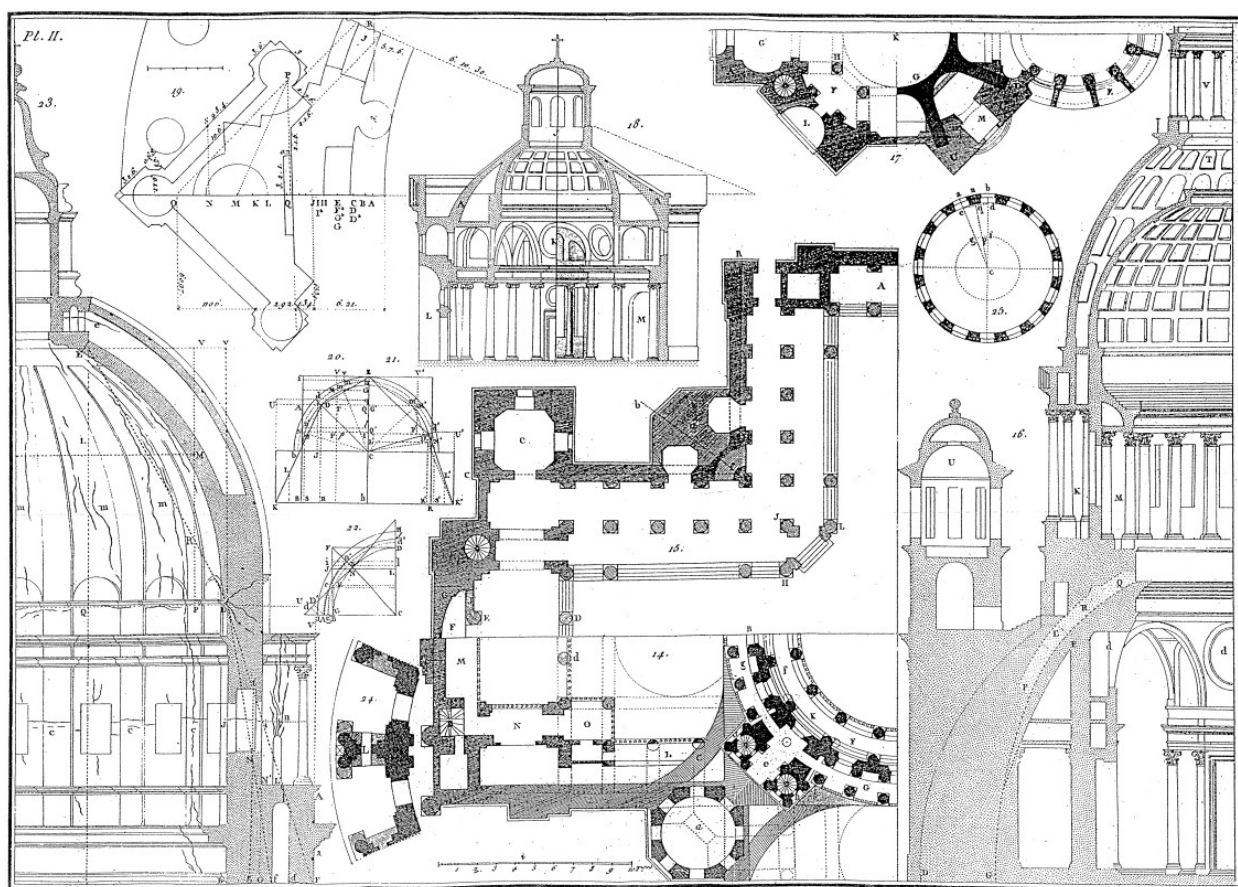


1.22. Retrato de Émiland-Marie Gauthey

rias “on pourra considérer cette voûte comme n’ayant aucune poussée” (se puede considerar que la bóveda no tiene empuje)”. A Rondelet se le quedó grabada esta idea.

Gauthey también dejó patente su fascinación por la elaboración de la construcción gótica:

“C’est peut-être au détriment de l’art que nous avons abandonné totalement ce genre d’architecture, qui avoit sans doute des beautés: les constructions des édifices faits dans le temps où il étoit en usage, quoique d’un goût absolument différent du nôtre et souvent bizarre, sont certainement plus savantes que tout ce qui nous reste de l’architecture antique, et il seroit à désirer qu’en



conservant les belles formes et les ornements de l’architecture grecque, l’architecture moderne pût imiter l’art des constructions et la légèreté de la gothique”.<sup>3</sup>

(Tal vez sea en detrimento del arte que hayamos abandonado totalmente este tipo de arquitectura, que sin duda tenía sus bellezas: las construcciones de los edificios realizados en la época en que estaba en uso, aunque de un gusto absolutamente diferente

1.23. Estudio de estabilidad de estructuras abovedadas realizado por Gauthey en su “Dissertation sur les dégradations du Panthéon français” (1798)

3. Émiland-Marie Gauthey en su *Dissertation sur les dégradations du Panthéon français*, 1798

al nuestro y a menudo extrañas, son sin duda más hábiles que todo lo que nos queda de la arquitectura antigua, y sería deseable que, conservando las bellas formas y ornamentos de la arquitectura griega, la arquitectura moderna pudiera imitar el arte de la construcción y la ligereza de la arquitectura gótica).

A pesar de las rarezas y extravagancias de las sugerencias de Gauthey, está claro que entendía la dinámica de la construcción. Terminó declarando que los pilares que Soufflot había construido no sólo podían soportar la cúpula que había diseñado, sino que podían soportar una cúpula aún mayor.

Cuando Marigny se retiró en julio de 1773, la *Direction des Bâtiments du Roi* fue asumida por el abad Joseph-Marie Terray, a quien Patte envió de inmediato una copia de su *Mémoire*, pero no tuvo mucho efecto. Cuando Terray fue sucedido, en agosto de 1774, por el Conde Charles de la Billarderie d'Angiviller, se envió otra copia del *Mémoire*, pero en esta ocasión, Patte fue firmemente rechazado. Se le informó de que no era necesario retomar el asunto. Sin embargo, la disputa se repetiría una y otra vez a lo largo de los años que quedaban de siglo, ya que se trataba de una cuestión muy seria: si los procedimientos establecidos debían seguir siendo la base del diseño estructural o si debían formularse nuevas teorías de las estructuras, basadas en el cálculo y el estudio experimental de la resistencia de los materiales.



## 2 Geometría

### 2.1 Influencias anteriores: cúpulas dobles y triples

Aunque una cúpula de este tipo sobre la iglesia de Sainte-Geneviève es sin duda muy atrevida, la idea de base no es nueva. Procede de edificios del siglo XVII, que he mencionado anteriormente, como la iglesia de Los Inválidos, la de Val-de-Grâce, la de San Pedro y, sobre todo, recuerda especialmente a la de San Pablo de Londres por la forma claramente cónica del cuerpo intermedio de la cúpula que sostiene la linterna.

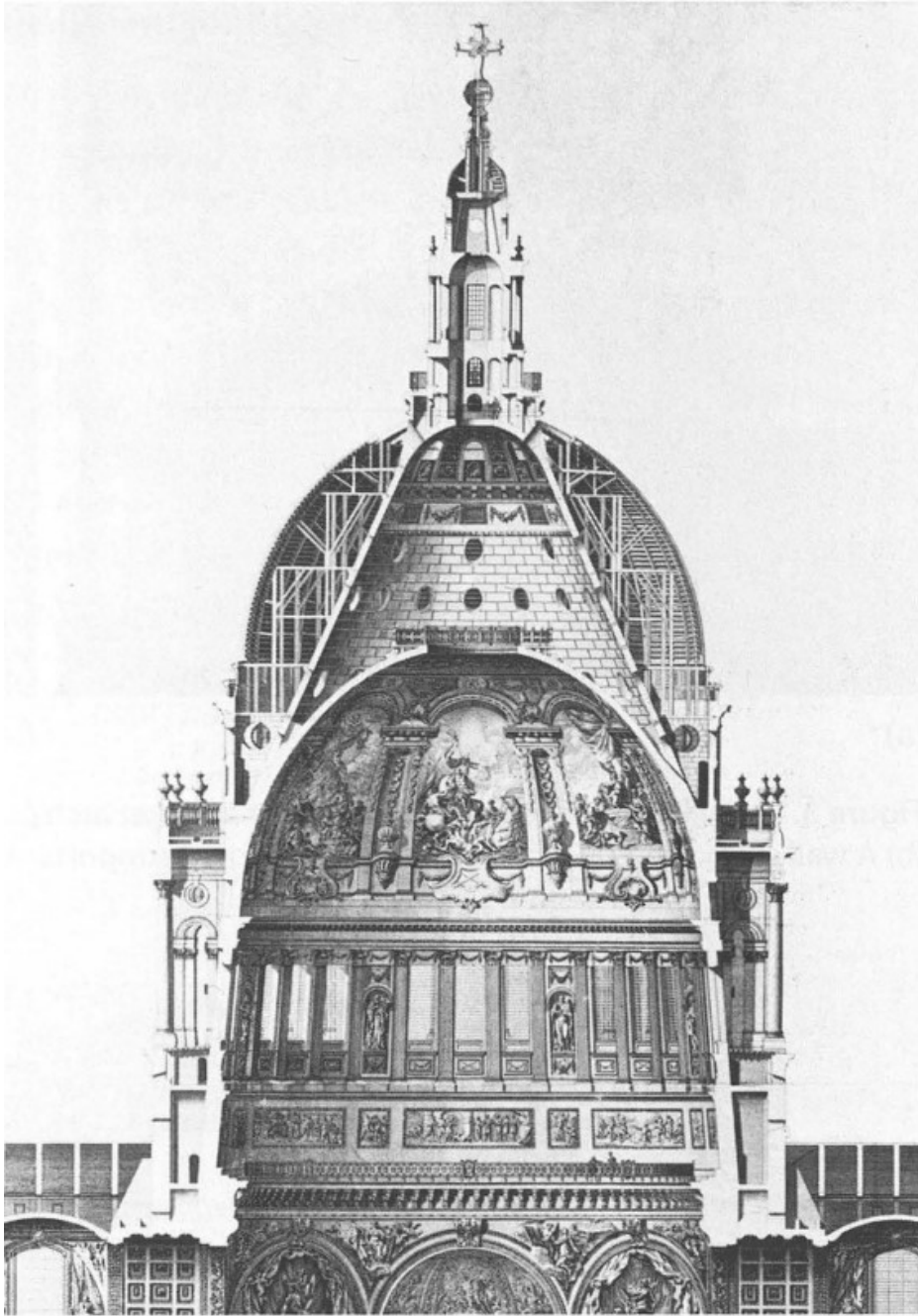
Imitando a la cúpula de San Pablo de Londres, el armazón intermedio tenía un perfil de catenaria, como los arcos exteriores de la base. Además, la cúpula se rodeó con 23 anillos de hierro, se colocaron tirantes radiales entre la columnata y el tambor, y anclajes entre cada dos hiladas de sillares. Pero mientras que el cono de San Pablo es de ladrillo, el ovoide del Panteón es de piedra. A la estabilidad de esta cáscara contribuyen también dos escaleras construidas en su extradós, que conectan por abajo con una escalera de caracol ideada entre los muros del tambor.

En definitiva, Sainte-Geneviève debe a la iglesia de Wren sus contrafuertes y el perfil de su cúpula (fig 2.1).

El perfil general y la organización interna de la cúpula también deben algo a la cúpula diseñada por Jules Hardouin-Mansart en Les Invalides. De abajo a arriba, una primera cúpula revela una segunda, iluminada por aberturas que no son visibles desde la iglesia. Sobre esta segunda un armazón sostiene la cúpula exterior y la linterna, que se apoya en una balaustrada, como en Los Inválidos.

La extraordinaria posición de semejantes cúpulas, cuyas bases estaban situadas a una gran altura sobre el suelo, había obligado a casi todos los arquitectos que habían construido antes que Soufflot a construir pilares muy grandes para sostenerlas. La cúpula de San Pedro en Roma, que es la más grande que existe y la más alta, se apoya en pilares cuya anchura es igual a la mitad del diámetro de la cúpula; los pilares de la cúpula de San Pablo en Londres tienen más o menos la misma dimensión relativa; los del Val-de-Grâce son mucho más grandes; la mayoría de las demás cúpulas, que también tienen pilares muy grandes, se apoyan en macizos considerables e incluso en bóvedas que dan a estas cúpulas bases muy grandes. Cuando se elevó la iglesia y se comparó la superficie de los pilares que sostenían la cúpula con las demás construidas hasta ese momento se quedaron asombra-

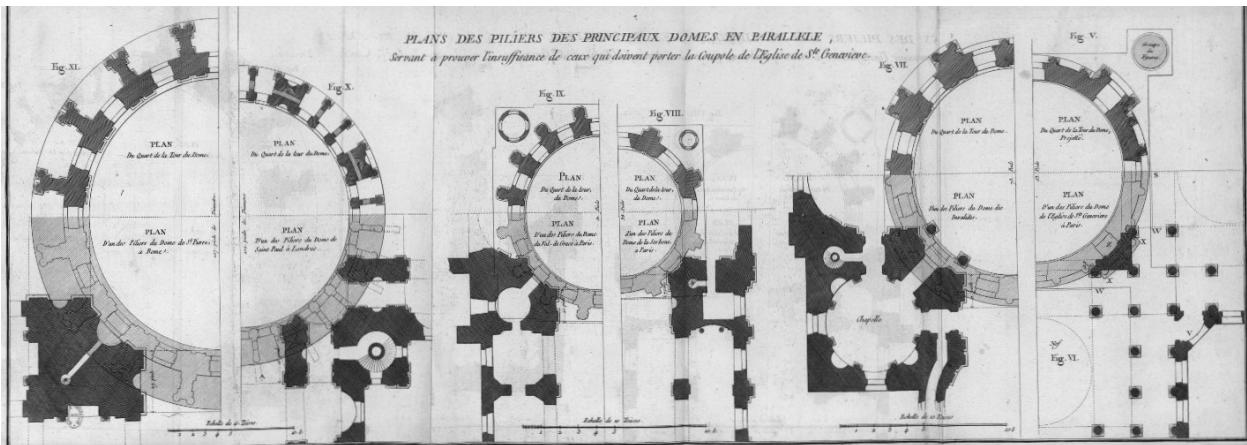
dos por su relativa pequeñez, de ahí que este tema suscitara tanta preocupación y revuelo.



2.1. Sección por el crucero de la Catedral de San Pablo de Londres (1755)

Tanto Rondelet como Patte o Gauthey estudiaron a conciencia las dimensiones y proporciones que tenían estos edificios para poder compararlos entre ellos y así determinar los espesores óptimos de los soportes y la geometría de la cúpula que apoyaría sobre ellos.

Patte, como he mencionado anteriormente, había creído demostrar que esos pilares no bastarían para sostener la cúpula. Comparó los dibujos de las cúpulas de San Pedro en Roma, San Pablo en Londres, Les Invalides, Val-de-Grâce y la Sorbonne con la de Sainte-Geneviève; pero para que hubiera podido dar alguna probabilidad a su afirmación, habría tenido que demostrar que los pilares de las cúpulas que citaba sólo tenían las dimensiones exactas que deberían haber tenido para soportar el peso. Como eran mucho más grandes de lo necesario, estos ejemplos no podrían servir a su propósito.



2.2. Comparación de dimensión de pilares de varias cúpulas realizado por Patte en su Mémoire de 1770

Gauthey señaló que no era comparando estas cúpulas por la superficie de sus pilares en relación con su diámetro como se podía juzgar qué pilares eran más o menos pesados. La única manera de hacer esta comparación era averiguar para cada una de ellas qué peso soportaba cada pie cuadrado. En la siguiente tabla veremos que en San Pedro este peso es de 22 mil, en San Pablo de 36 mil y en el Panteón de 48 mil.

2.3. Comparación de pesos que soportan los pilares por pie cuadrado (1798)

	Saint-Pierre de Rome.	Saint - Paul de Londres.	Panthéon françois.	Coupole de Givry.	St.-Augustin de Plaisance.
Diamètre intérieur.....	127 p...	102 p...	619 p...	56 1/2 p...	29 p...
Surface des piliers.....	11,152. ....	2,580. ....	548. ....	74. ....	88. ....
Cube de la charge sur les piliers.	244,465. ....	93,072. ....	26,680. ....	2,151. ....	2,900. ....
Charge par pied carré.....	21,910 liv..	36,059 liv..	48,687 liv..	28,740 liv..	32,958 liv..

Comparaison du poids que portent les piliers de différents dômes.

El resultado de esta comparación es que los pilares del Panteón están efectivamente más cargados que los demás, pero no en una desproporción tan grande como podría pensarse considerando sólo las superficies comparadas con los diámetros, ya que cada pie cuadrado de los pilares del Panteón no soporta mucho más del doble que los de los pilares de San Pedro de Roma, que es en la que los pilares tienen la menor carga. Sin embargo, podemos ver en todos estos ejemplos que la carga es muy diferente en cada

una de ellas, ya que varía en más del doble, lo que demuestra que en la construcción de todas estas cúpulas no se siguió ninguna regla derivada de la carga que pueden soportar las piedras.

En conjunto, el Panteón es una obra audaz e ingeniosa, como lo demuestra el estudio superficial de su planta y sección. La cantidad de mampostería necesaria se redujo evidentemente al mínimo, de hecho, incluso parece haber superado ese peligroso extremo estructural, aunque estamos dispuestos a creer que, dada la buena piedra bien manejada y con cimientos adecuados, los pilares de Soufflot probablemente habrían sido adecuados.





## 2.2 La cúpula de Rondelet

### *Rondelet*

Rondelet fue un arquitecto que tuvo un papel fundamental en el transcurso de las obras que se realizaron para la cúpula de la iglesia de Sainte-Geneviève.

Como ya he mencionado, en 1770, tras la publicación de la Memoria de Patte Rondelet escribió una respuesta o “refutación”. Fue un fiel defensor del diseño que había propuesto Soufflot, quien sería su maestro. Esta refutación no se conserva íntegra, ni siquiera manuscrita. El único conocimiento que tenemos de su contenido son las notas escritas en los márgenes de una copia de la Mémoire de Patte, hoy en la Bibliothèque historique de la Ville de Paris. Las anotaciones de Rondelet estaban escritas originalmente a lápiz, y aún pueden distinguirse algunas, pero en algún momento fueron borradas.

Rondelet fue, durante toda su vida, muy económico de pensamiento. Una vez formulada una idea, una vez dada una explicación, la repetía una y otra vez cuando se presentaba la ocasión. Todos estaban de acuerdo en que no existía ninguna fórmula para calcular una cúpula y es cierto que hizo declaraciones que tenían fundamento.

Rondelet advirtió que se basaban con demasiada frecuencia en conceptos teóricos ajenos a la realidad de la construcción que en ocasiones resultaban dando hipótesis falsas. Muchos consideraban las piedras como cuerpos perfectamente pulidos que podían deslizarse y ser movidos con el más mínimo empujón, sin embargo, estas propiedades nada tienen que ver con el material fábrica.

Además, las reglas de Fontana que empleaba Patte para su teoría fueron bruscamente rechazadas por Soufflot. Se burlaba diciendo que Patte podría demostrar que muchas iglesias que se habían levantado nunca podrían haber sido construidas. Como bien habían manifestado otros personajes como Gauthey, las reglas de Fontana eran más adecuadas en el sentido del gusto que en el de la fuerza.

Sin embargo, es increíble pensar cómo fue posible construirse una cúpula de tal magnitud teniendo en cuenta la falta de base en cuanto a conocimiento y entendimiento del comportamiento de carga de las estructuras abovedadas de fábrica que tenía Rondelet.

Falsamente opinaba que las cúpulas prácticamente no tenían empujes hacia el exterior, y que los de la cúpula de Sainte-Geneviève serían contrarrestados directamente por las bóvedas y muros circundantes, el peso de la cúpula podría dirigirse directamente hacia los cuatro pilares inferiores.

Algunos arquitectos e ingenieros del momento hicieron un apunte sobre esta cuestión.

El ingeniero Navier expresó: “Las nociones presentadas por este arquitecto, que siempre ha sostenido que las bóvedas no tienen empuje horizontal, no se ajustan a la verdad”.<sup>1</sup>

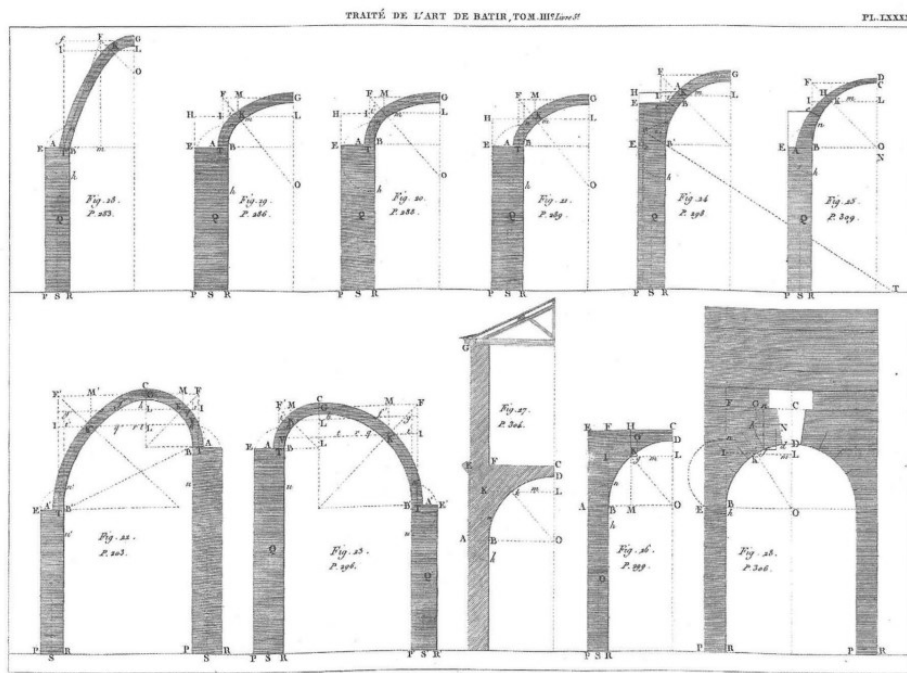
El ingeniero Gauthey también comentó:

“ Le citoyen Rondelet ayant fait un chapitre où a prétendu prouver que ces voûtes n’avoient aucune poussée, j’ai pensé que cette proposition pourroit induire en erreur quelques architectes dans des édifices importants, et dont la ruine seroit infaillible si l’on ne donnoit pas aux piédroits des épaisseurs convenables (...) ”.<sup>2</sup>

(Habiendo escrito el ciudadano Rondelet un capítulo en el que pretendía demostrar que estas bóvedas no tenían ningún empuje, pensé que esta proposición podría inducir a error a algunos arquitectos de edificios importantes, cuya ruina sería infalible si no se dieran a los estribos espesores adecuados).

Así, tenemos el caso memorable de que la cúpula de Santa Genoveva, obra maestra del arte de las bóvedas, fue concebida y construida con un conocimiento evidentemente deficiente de la forma y del comportamiento portante.

Rondelet, realizó también un gran número de pruebas en modelos de arcos y maquetas con el objetivo de calcular la anchura de sus contrafuertes que, sin embargo, no llegaron a ninguna teoría útil. Elaboró incluso algunos ensayos con modelos de cúpulas de mampostería, cuyas conclusiones resultaron erróneas.



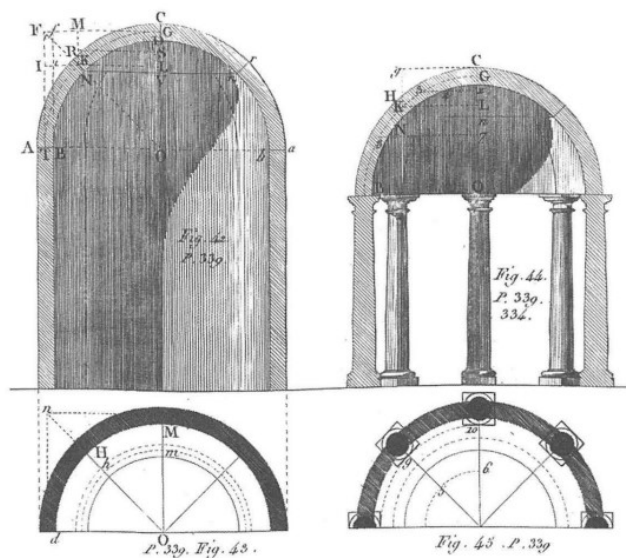
2.4. Pruebas de modelos de arcos de diferentes formas realizado por Rondelet (1814)

1. Navier, Claude Louis (1826) *Résumé des Leçons données à l'Ecole des ponts et chaussées*. Paris. 152.

2. Gauthey, Émiland-Marie (1798) *Dissertation sur les dégradations du Panthéon français*. Paris. 7.

Mientras trataba de dar con una respuesta para la estructura del Panteón de París, desarrolló un modelo de cúpula semiesférica de espesor uniforme y trató de estudiar dos soluciones para sostenerla. Una era un muro continuo del mismo grosor que la cúpula, y la otra, ocho columnas equidistantes. En ambos casos, según Rondelet, la cúpula se mantenía en pie. Aún así, la simplificación que hace para su estudio es desproporcionada, ya que no tiene en cuenta la complejidad de toda la geometría en su conjunto.

2.5. Pruebas de modelos de cúpulas apoyadas sobre un muro continuo y sobre columnas (1814)



### La cúpula

Soufflot, afectado moralmente, murió a los sesenta y siete años, mientras se construía la base del tambor. Durante los veintiocho años siguientes, la estabilidad de la estructura ejerció la sagacidad de los ingenieros y estimuló la inventiva técnica de Rondelet. En un edificio en el que los recursos de la construcción tradicional habían sido puestos a prueba de forma desmesurada, utilizó todos los medios para reforzar la piedra con metal.

Este edificio marca el final de la era de las cúpulas monumentales. Fue la primera estructura abovedada importante cuyo diseño se basó en cálculos estáticos y de resistencia de materiales. Es de una incomparable audacia y nunca más se construiría una cúpula de mampostería tan ligera

El informe tan exhaustivo que llevo a cabo Rondelet de la cúpula de Sainte-Geneviève tras la muerte de Soufflot permite conocer muchos detalles acerca de su geometría, su proceso constructivo y los problemas que surgieron a lo largo de su construcción. La intención de este informe era plasmar las ideas que había desarrollado Soufflot para así mantener su diseño de la cúpula. Es más, el nuevo *Directeur des Bâtiments du Roi* D'Angiviller ordenó que se atuvieran estrictamente a los diseños de Soufflot para completar la iglesia.

Se hicieron algunos ajustes, sobre todo en el diseño de la cúpula más interior. Pasó de una sucesión de nervaduras intercaladas con grandes aberturas arqueadas a una cúpula continua, artesonada uniformemente en el interior a la manera antigua. La cúpula intermedia, en cambio, apenas sufrió cambios respecto a la propuesta que hizo Soufflot, ya que estaba muy aligerada. Contaba con cuatro grandes arcos parabólicos o catenarios que, a su vez, actuaban como soporte para la linterna transmitiendo sus empujes al cuerpo inferior. La cúpula exterior estaba formada por una serie de nervaduras, con arcos escalonados entre ellas, para crear algo parecido a una estructura enmarcada y a su vez para aligerar un poco más toda la estructura del conjunto. Todos estos detalles y decisiones que se tomaron en los dibujos se elaboraron en gran medida en la cúpula que se construyó. También se hicieron cambios en el exterior, en particular en la balaustrada, el ático y la silueta de la cúpula exterior. Además, se modificaron algunos de los materiales propuestos, como un revestimiento de plomo en lugar de cobre para la cúpula. No cabe duda de que el diseño de la cúpula estaba decidido antes de la muerte de Soufflot.

Por otro lado, en los estudios que hizo en su *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français* Rondelet limpió el buen nombre de Soufflot como constructor, pues se demostró que la principal dificultad surgía de la utilización de mampostería pobre y de piedra quebradiza para los pilares, debido a las economías poco previsoras de un clero poco apreciativo durante las últimas décadas del siglo anterior.

Las fechas de algunos dibujos sugieren que los planos se prepararon entre seis meses y un año antes de la construcción. Las piedras de muestra, casi siempre bajo la dirección de Rondelet, se tallaban con mucha antelación. Pero pronto se puso en marcha un nuevo medio para supervisar el diseño y controlar el trabajo, claramente bajo la dirección de Rondelet.

En 1785 se inició la construcción de una gran maqueta de la iglesia (fig.2.6.) , a escala 1 a 25, en piedra, que todavía se encuentra en la sacristía de la iglesia, y que se continuó firmemente durante los años siguientes, con constantes ajustes y alteraciones. El trabajo se concentraba, por regla general, en los meses de invierno.

Un elemento que también sufrió muchas variaciones fue la linterna. Se realizaron numerosos diseños y en ocasiones no se relacionan entre unos planos y otros. La linterna del modelo se consiguió en enero de 1787, pero en dos meses se sustituyó por una nueva.



2.6. Maqueta del Panteón  
realizada por Rondelet en 1785



### 2.3 Análisis y volumetría de la cúpula

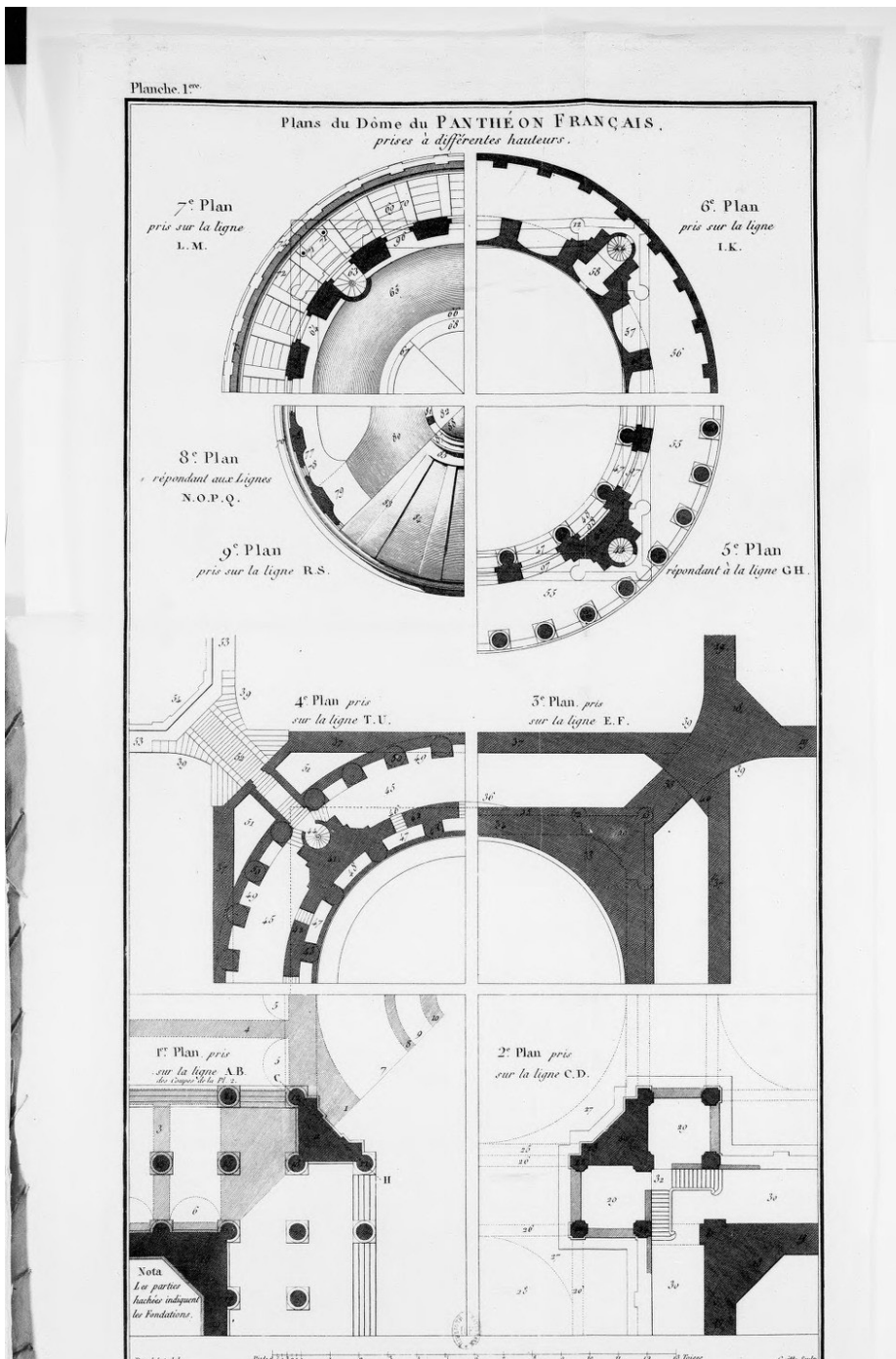
A partir de la documentación recopilada me baso en los planos dibujados por Rondelet en su *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français* para analizar el volumen de la cúpula.

Resumiendo las explicaciones que he mencionado previamente, la cúpula del Panteón francés es una cúpula triple. Está formada por una cúpula interior artesonada sobre pechinas que transmiten el peso de todo el conjunto sobre los pilares. Como he insistido varias veces, es ingenuo suponer que solo apoya sobre estos pilares, ya que toda la base con sus sistemas de bóvedas, arbotantes y contrafuertes colaboran en el equilibrio y estabilidad de todo el conjunto. Sobre la cúpula interior se encuentra esta cúpula intermedia tan característica conformada por cuatro arcos catenarios que sostienen el peso de la linterna. Por último, la fina cáscara exterior que encierra todo el espacio presenta unas aberturas que permiten aligerar la estructura.

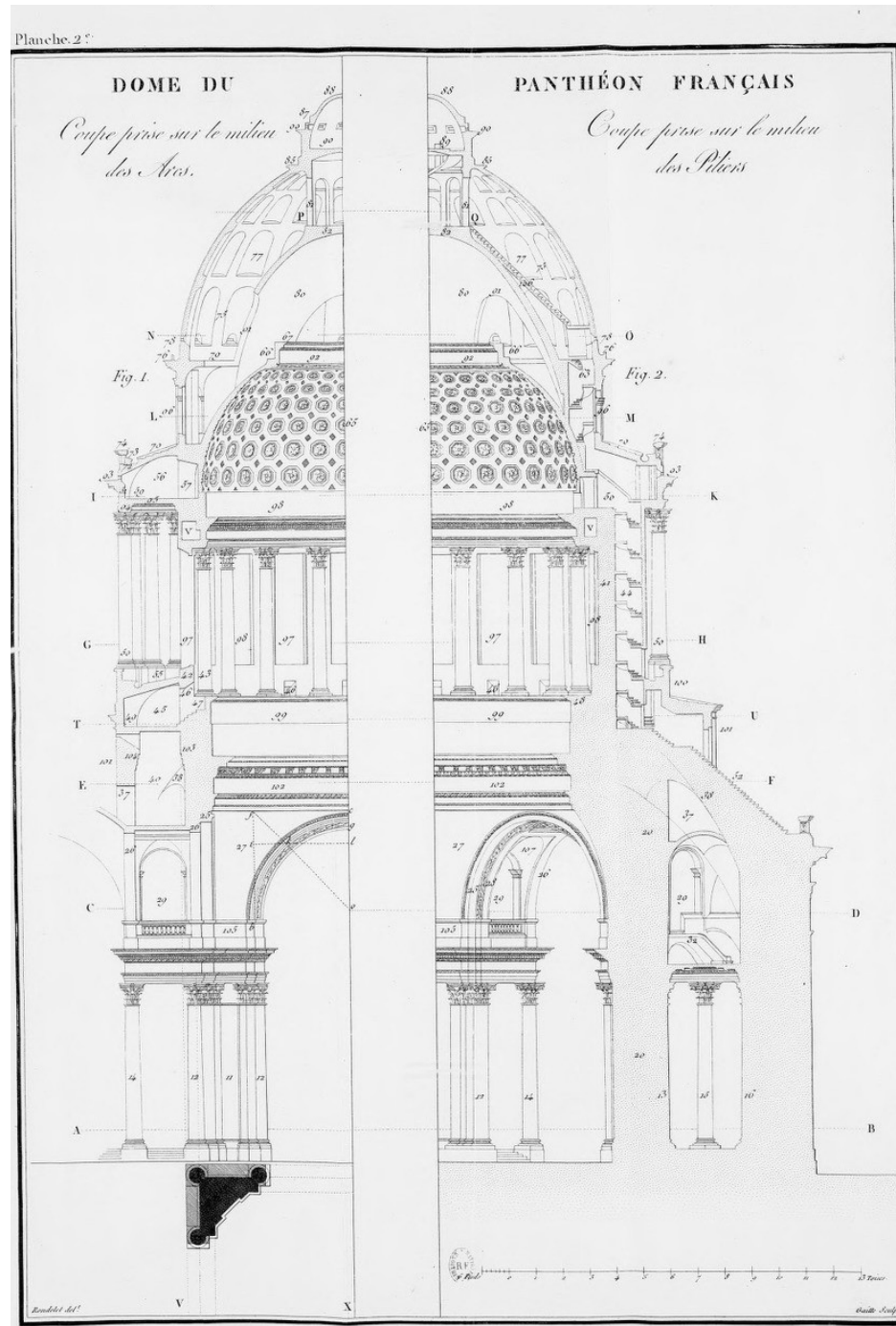
A pesar de tener en cuenta esta composición, es muy complejo entender la cúpula por completo; cuenta con muchas galerías y espacios que no son visibles desde la parte inferior.

El primer paso que tomo es elaborar una sección y un alzado muy detallados para a partir de la planta comprender las alturas y los encuentros que existen entre cada una de las piezas.

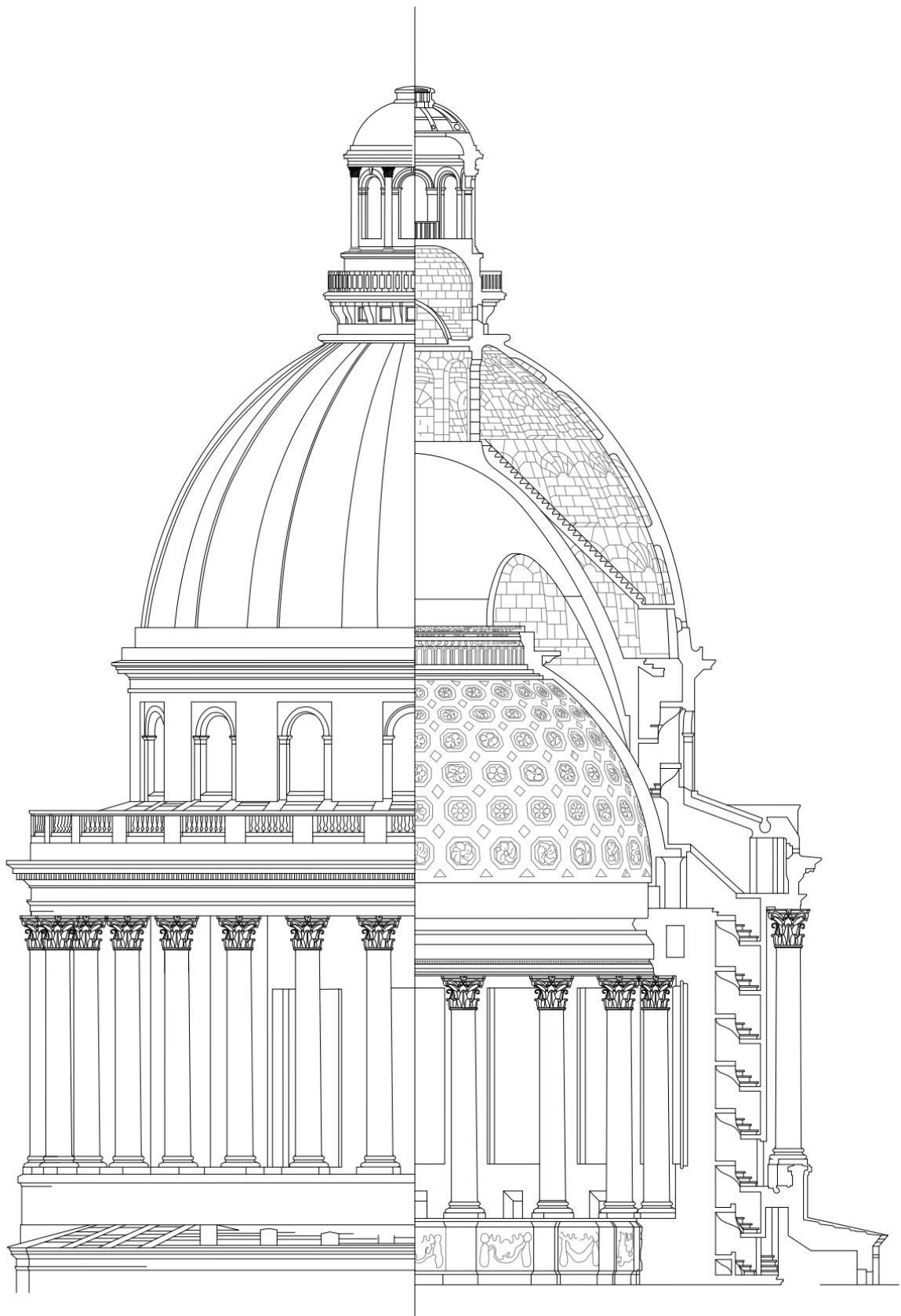
Los dibujos realizados me servirán para elaborar un modelo tridimensional con cada uno de los elementos característicos de la cúpula.



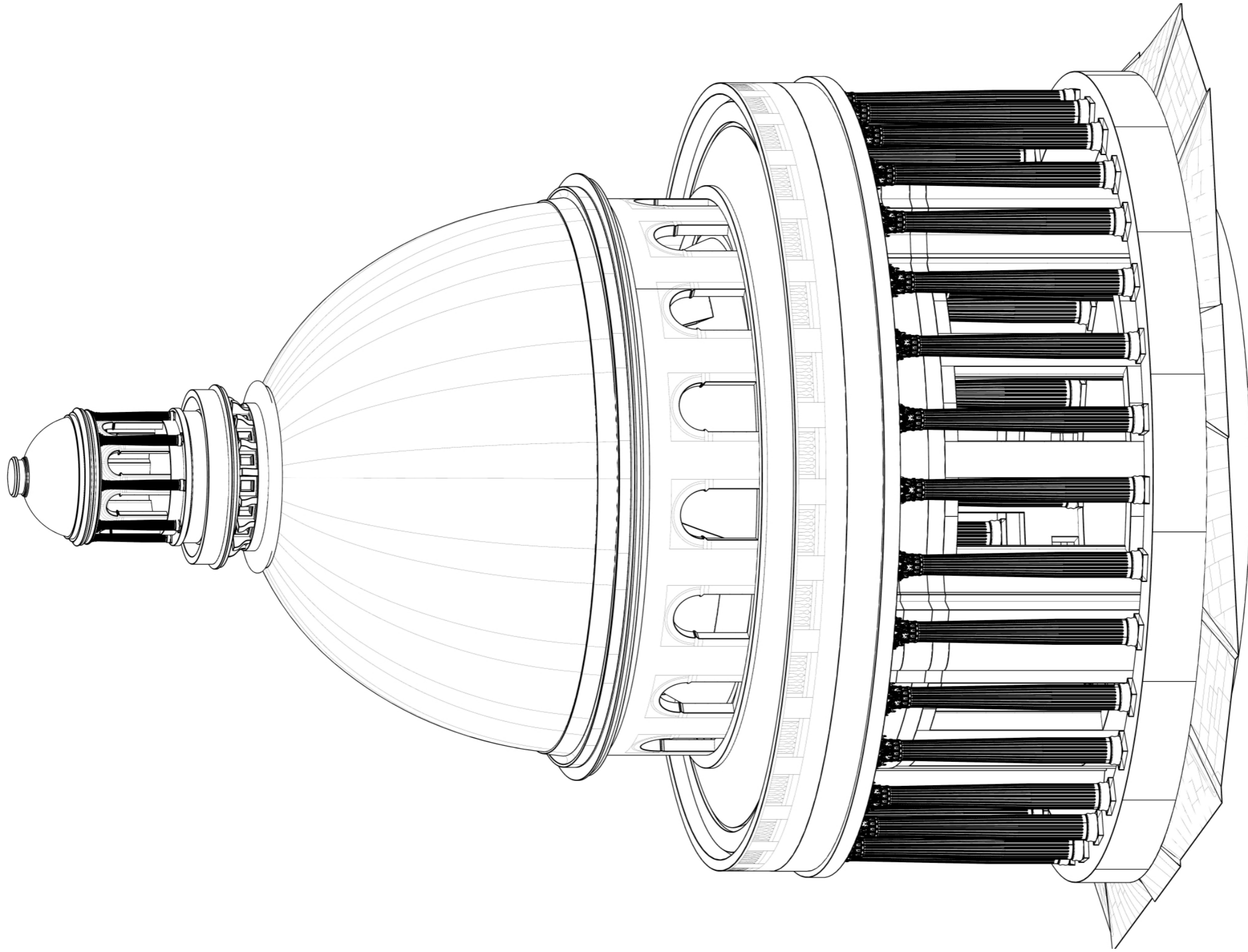
2.7. Plantas a distintos niveles de la cúpula del Panteón (Rondelet 1797)

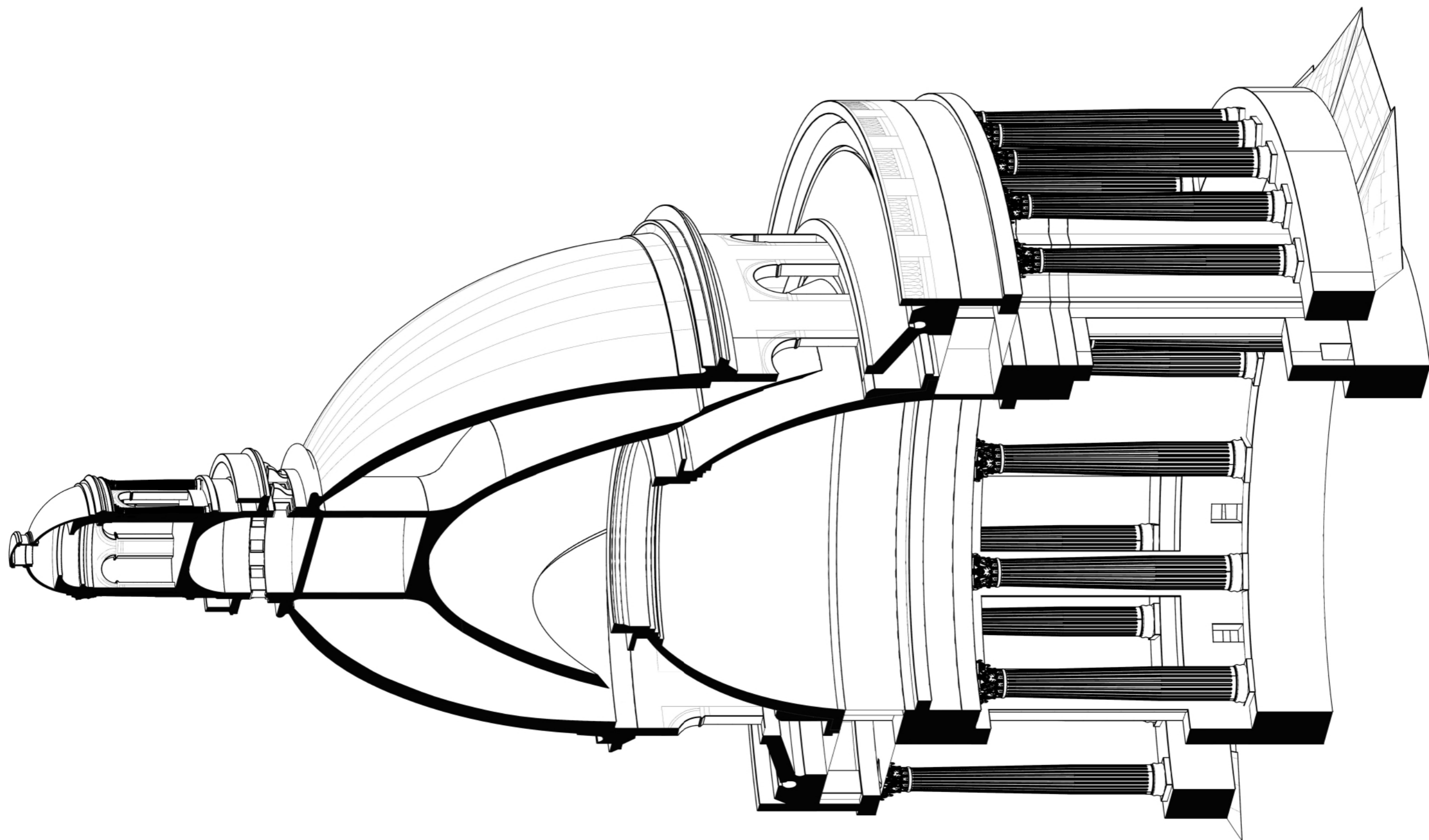


2.8. Sección por el crucero de la cúpula y por la diagonal (Rondelet 1797)



2.9. Sección-Alzado de la cúpula del Panteón (elaboración propia)





2.11. Axonometría seccionada  
(elaboración propia)





## 2.4 Cálculo de estabilidad

### Marco teórico

Esta parte corresponde a un trabajo de curso que me llevó a incidir en el resto de temas.

Las estructuras de fábrica están constituidas por un material esencialmente discontinuo, heterogéneo y anisótropo. Se usará el teorema de la seguridad desarrollado por el profesor Heyman, que simplifica el problema a un enfoque de equilibrio.

Desde hace unos años se viene teniendo en cuenta el cálculo de estructuras en relación con los estados límites. En materiales más “modernos” como el acero o el hormigón este tipo de estudios pueden jugar un papel fundamental para sus estructuras. Sin embargo, en el material fábrica aunque también podrían estar presentes es razonable considerar este criterio como secundario. Los tres criterios estructurales fundamentales para las fábricas son los de resistencia, rigidez y estabilidad.

La estructura debe ser suficientemente resistente como para soportar su peso propio y cualquier tipo de carga, no debe deformarse excesivamente y deben evitarse los desplazamientos tanto locales como globales que afecten a su equilibrio estructural. Es difícil que se produzcan daños que afecten a la integridad del edificio con respecto a los criterios de resistencia y rigidez. Es instintivo pensar que la fábrica no falla en ese aspecto, como se evidencia con las estructuras antiguas que se han mantenido en pie durante tantos siglos. Esta cuestión se tratará más adelante, pero es un hecho que las tensiones medias que soporta una estructura de fábrica son bajas.

En definitiva, resistencia y rigidez tampoco serían prioritarias en el proyecto de fábricas. Lo realmente importante de una estructura de fábrica es el criterio de estabilidad. Un pilar de acero, por ejemplo, debe calcularse para que no pandee, ahora bien, los pilares de fábrica de una iglesia no plantean ese problema.

La manera en que la estabilidad de una estructura de fábrica puede verse afectada es curiosa. Por poner un ejemplo, es cierto que un arco puede ser perfectamente estable actuando bajo la acción de una carga  $P$  de cierta magnitud y su peso propio. Sin embargo, existe un momento en el que si la carga  $P$  excede un cierto valor se produce un cambio brusco que pone fin a la estabilidad. Las tensiones siguen siendo bajas y las deformaciones despreciables pero se produce un mecanismo, es decir, aparecen movimientos o desplazamientos que afectan al equilibrio del conjunto provocando un colapso. Para evitar esta cuestión es necesario determinar las proporciones correctas de los elementos, calculando los espesores mínimos correspondientes a las cargas que actúan sobre ellos.

Las reglas de proporción aplicadas correctamente permiten construir una estructura de fábrica que se mantendrá en pie. Esta fue la obsesión que

ocupó la mente de los matemáticos, ingenieros y arquitectos que estudiaron el caso del Panteón.

Para el cálculo de estabilidad se hará una simplificación del perfil de las cúpulas. Se parte de la sección elaborada a partir de los planos de Rondelet de su *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français*.

Consideramos pues las siguientes hipótesis:

- El material fábrica trabaja a compresión.
- Las tensiones son bajas.
- No hay peligro de deslizamiento.

### Casos de estudio

Para el análisis de equilibrio consideramos dos casos de estudio:

- Caso 1: cúpula exterior
- Caso 2.a: cúpula intermedia
- Caso 2.b: cúpula interior

Las cúpulas del Panteón están construidas con “*Pierre de liais*” un tipo de piedra caliza extraída de las canteras de la cuenca de París.

Peso específico de la caliza:  $\gamma = 24 \text{ KN/m}^3$

#### *Caso 1: cúpula exterior*

La cúpula exterior tiene un espesor muy pequeño, es delgada y por tanto la cúpula se contempla como una membrana.

- Teoría de la membrana:

“Del mismo modo que en un arco de fábrica de espesor suficiente se pueden trazar infinitas líneas de empujes, una cáscara de espesor finito puede contener infinitas superficies de empujes, que se separan de la superficie media. Si en estas superficies todas las tensiones son de compresión, la solución es admisible y segura”<sup>3</sup>.

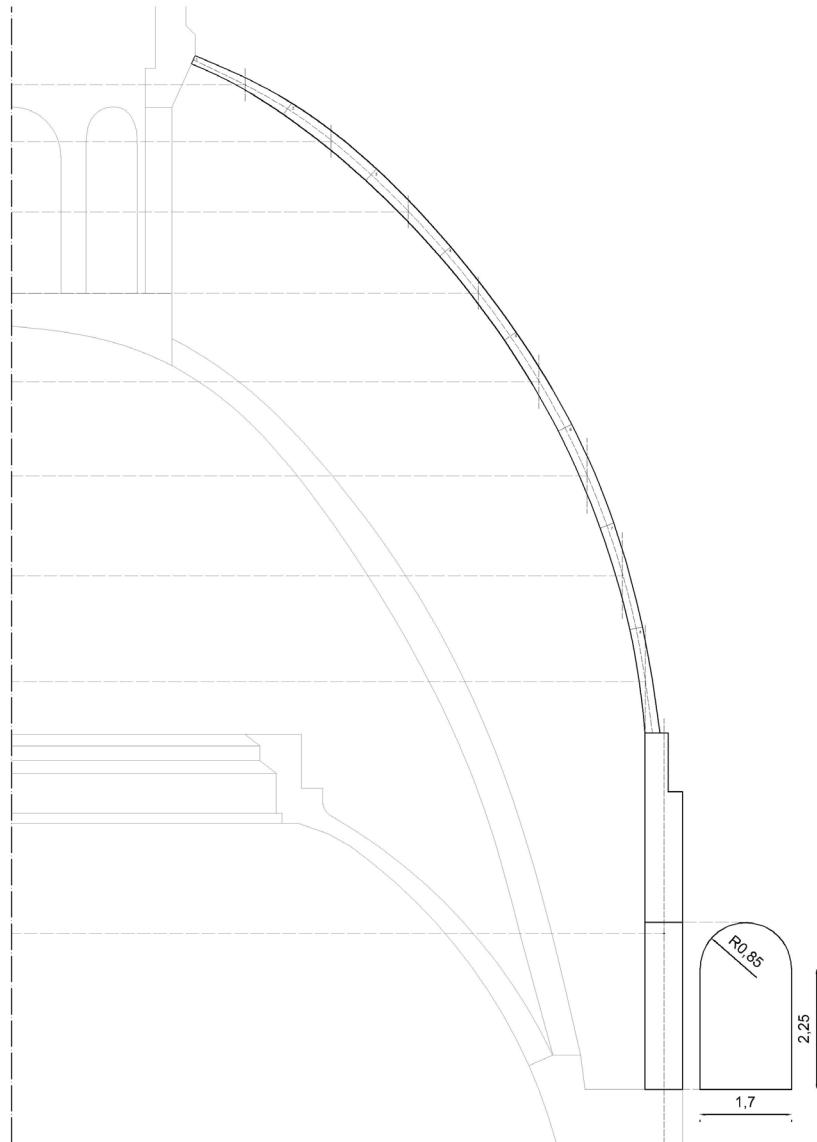
En el análisis partimos de la base de que existe una superficie de empuje de equilibrio, por lo que simplificamos el problema al cálculo del peso de la cúpula.

Suponemos que existe equilibrio en la cúpula y calculamos el peso total, por un lado las dovelas del arco que conforman la cúpula y por otro el “tambor” o base sobre la que apoya

Se muestra a continuación el cálculo de los pesos por el método de los cortes de manera gráfica:

3. Jacques Heyman en Equilibrio de cáscaras, 2022

2.12. Representación gráfica de pesos de la cúpula exterior (elaboración propia)



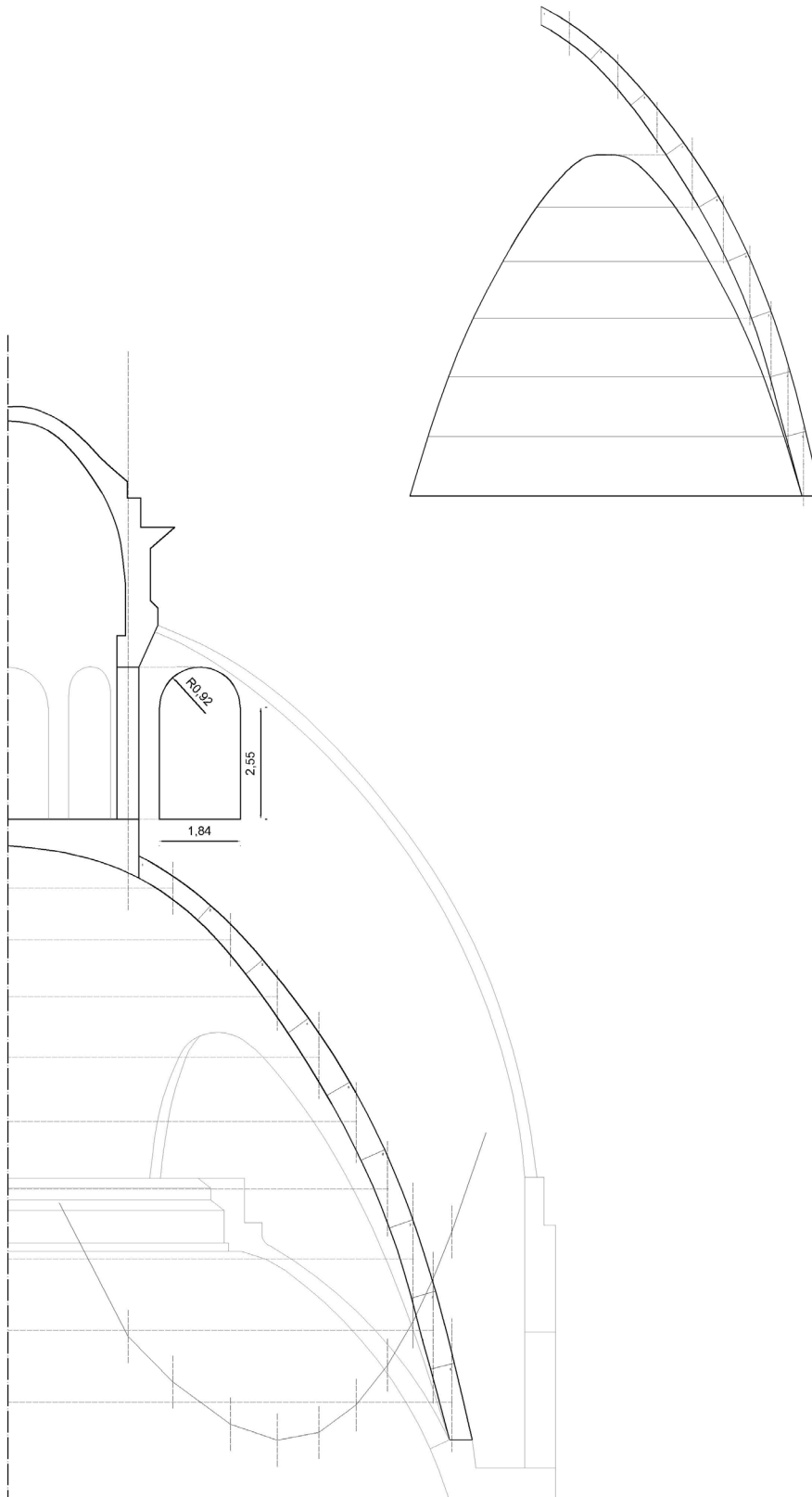
### Caso 2.a: cúpula intermedia

#### - Método de los cortes y de la estática gráfica

La cúpula que se va a analizar se reduce al ejercicio de cálculo de un arco de fábrica. Se procede a dividir el arco en una serie de dovelas y por el método de los cortes se determinan las fuerzas que actúan sobre los centros de gravedad de cada una de ellas. Una vez obtenidos estos datos se traza por medio de la estática gráfica una línea de empujes (existen líneas infinitas) que esté contenida en el arco y que cumpla los coeficientes de seguridad.

Primero, procedemos al cálculo de los pesos siguiendo el mismo procedimiento que en el caso anterior. En la cúpula intermedia tendremos que tener en cuenta el peso de la linterna, ya que apoya sobre ella. Además, de-

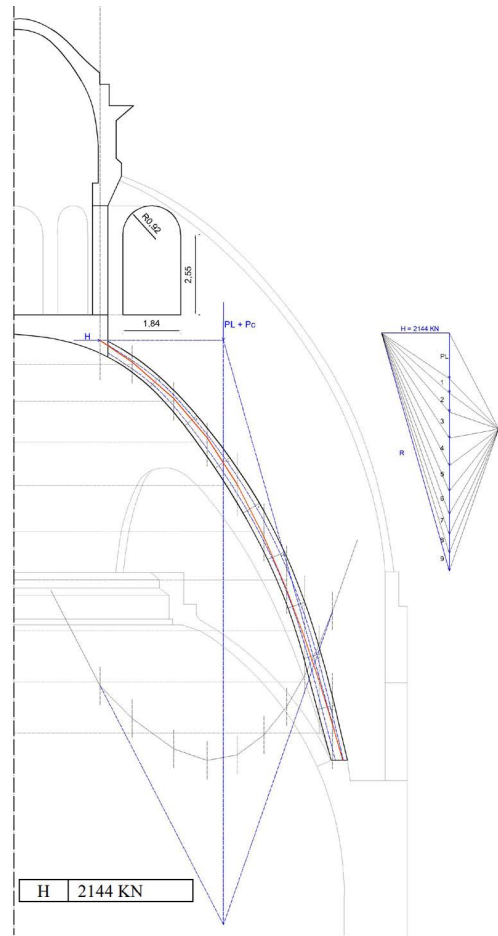
bemos descontar los 4 arcos catenarios que aligeran la estructura en las dovelas 4,5,6,7,8y 9. El peso del arco deberá multiplicarse por 4.



2.13. Representación gráfica de peso de arco catenario (elaboración propia)

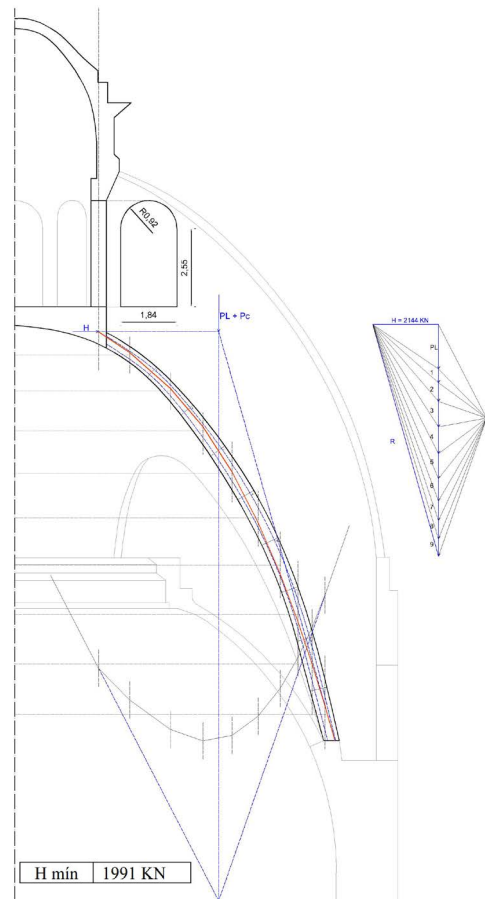
2.14. Representación gráfica de pesos de la cúpula intermedia (elaboración propia)

2.15. Representación de línea de empuje arbitraria en cúpula intermedia (elaboración propia)



Una vez obtenidos todos los pesos trazamos una línea de empujes arbitraria que pase por la mitad central, es decir, con un coeficiente geométrico mayor que 2.

2.16. Representación de línea de empuje mínima en cúpula intermedia (elaboración propia)



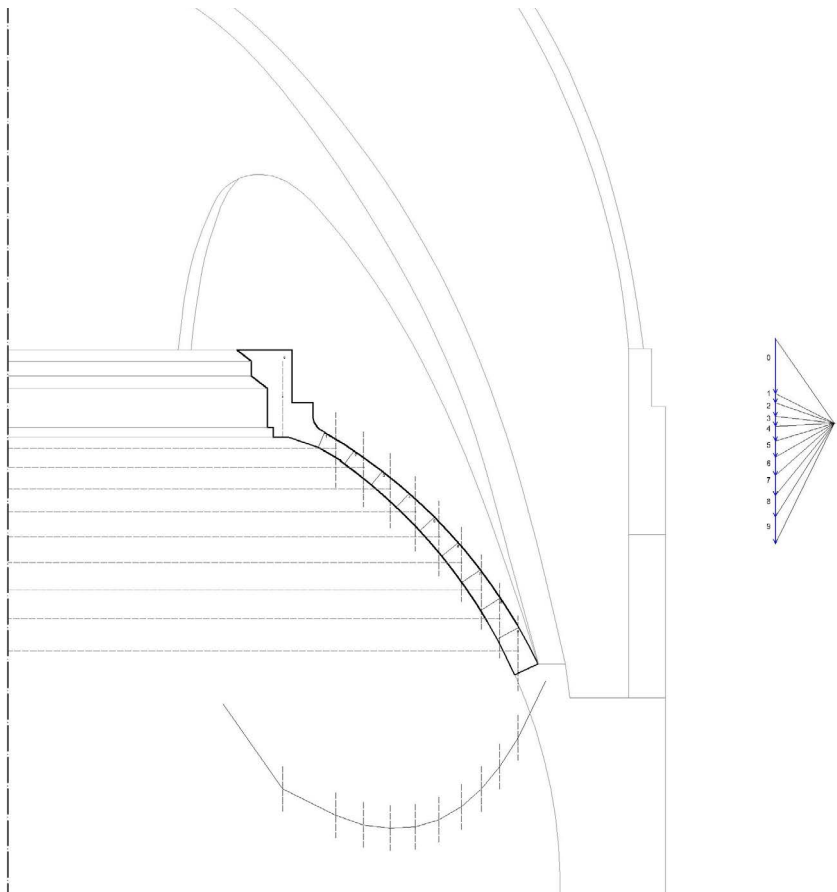
Trazamos la línea de empuje mínima que correspondería al ligero cedimiento (real o supuesto) del sistema de contrarresto.

*Caso 2.b: cúpula interior*

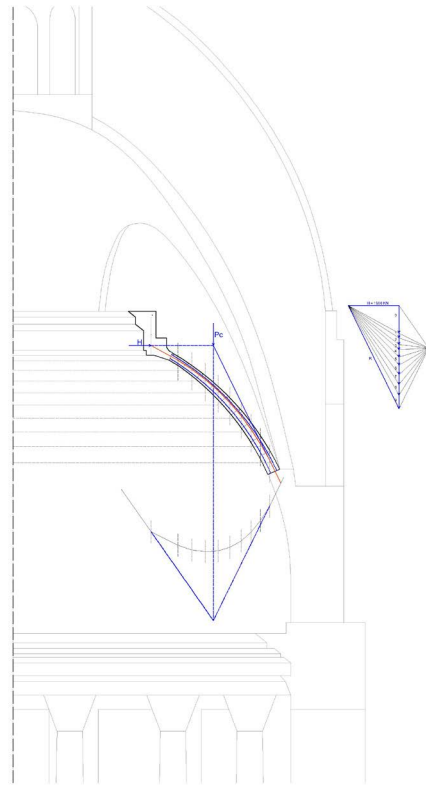
- Método de los cortes y de la estática gráfica

La cúpula que se va a analizar se reduce al ejercicio de cálculo de un arco de fábrica. Se procede a dividir el arco en una serie de dovelas y por el método de los cortes se determinan las fuerzas que actúan sobre los centros de gravedad de cada una de ellas. Una vez obtenidos estos datos se traza por medio de la estática gráfica una línea de empujes (existen líneas infinitas) que esté contenida en el arco y que cumpla los coeficientes de seguridad.

El caso de la cúpula interior es más sencillo, solo se tienen en cuenta el peso de las dovelas.



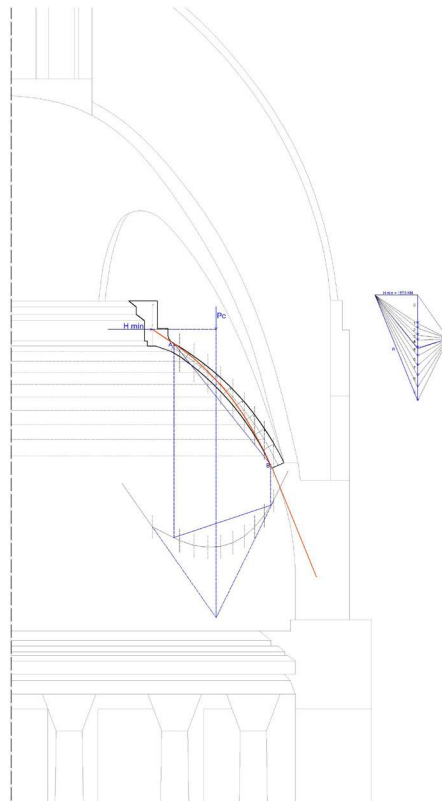
2.17. Representación gráfica de pesos de cúpula interior (elaboración propia)



Una vez obtenidos todos los pesos trazamos una línea de empujes arbitraria que pase por la mitad central, es decir, con un coeficiente geométrico mayor que 2.

H 1905,8 KN

2.18. Representación de línea de empuje arbitraria en cúpula interior (elaboración propia)



Trazamos la línea de empuje mínimo que correspondería al ligero cedimiento (real o supuesto) del sistema de contrarresto.

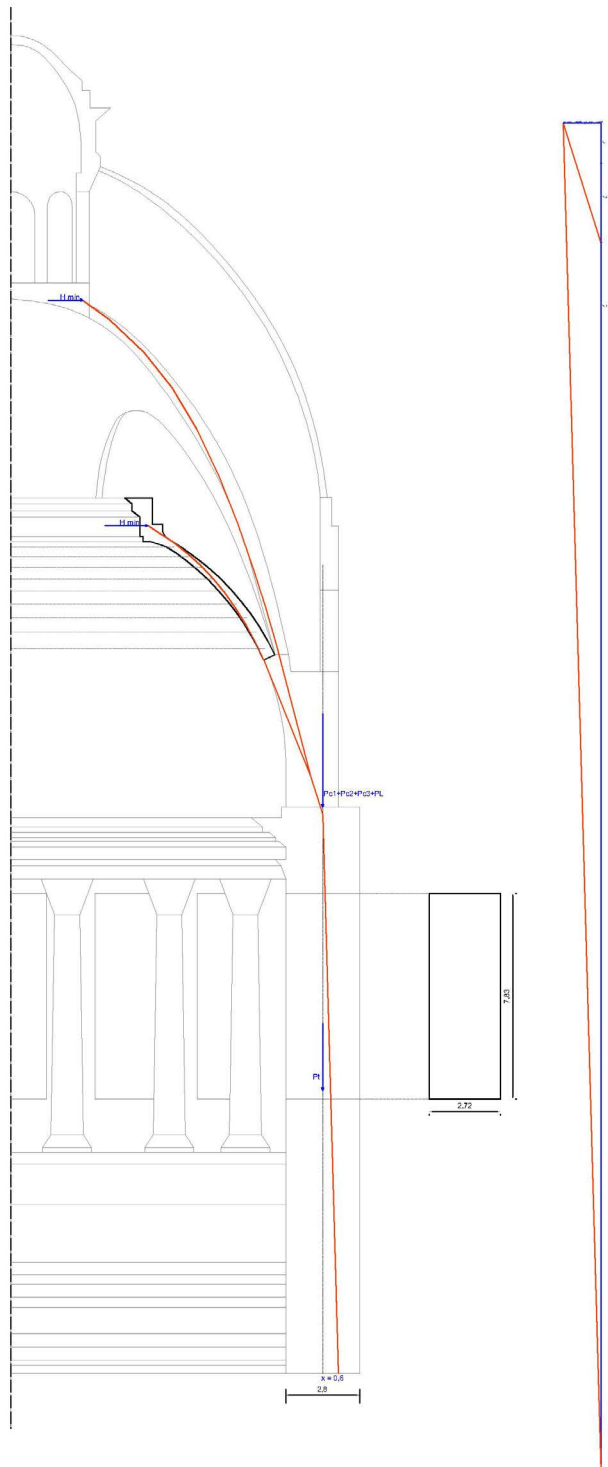
H mín 1578,3 KN

2.19. Representación de línea de empuje mínima en cúpula interior (elaboración propia)

### Sistema de apoyo - estabilidad de tambor

Con el empuje mínimo de la cúpula se procederá a imaginar una posible solución de equilibrio con las cargas bajando por el interior de la fábrica.

Una vez representada gráficamente la línea de empujes se procede a calcular el coeficiente de seguridad, que debe ser mayor que 2. Para ello se divide la mitad de la base del tambor; 1.4, entre la distancia que hay desde el centro del mismo hasta la intersección de la línea de empuje con la base; 0,6. Esto nos da un valor de 2.33, que es mayor que 2



2.20. Representación de líneas de empuje de la cúpula en el tambor (elaboración propia)

*Comprobación de tensiones en la base del tambor*

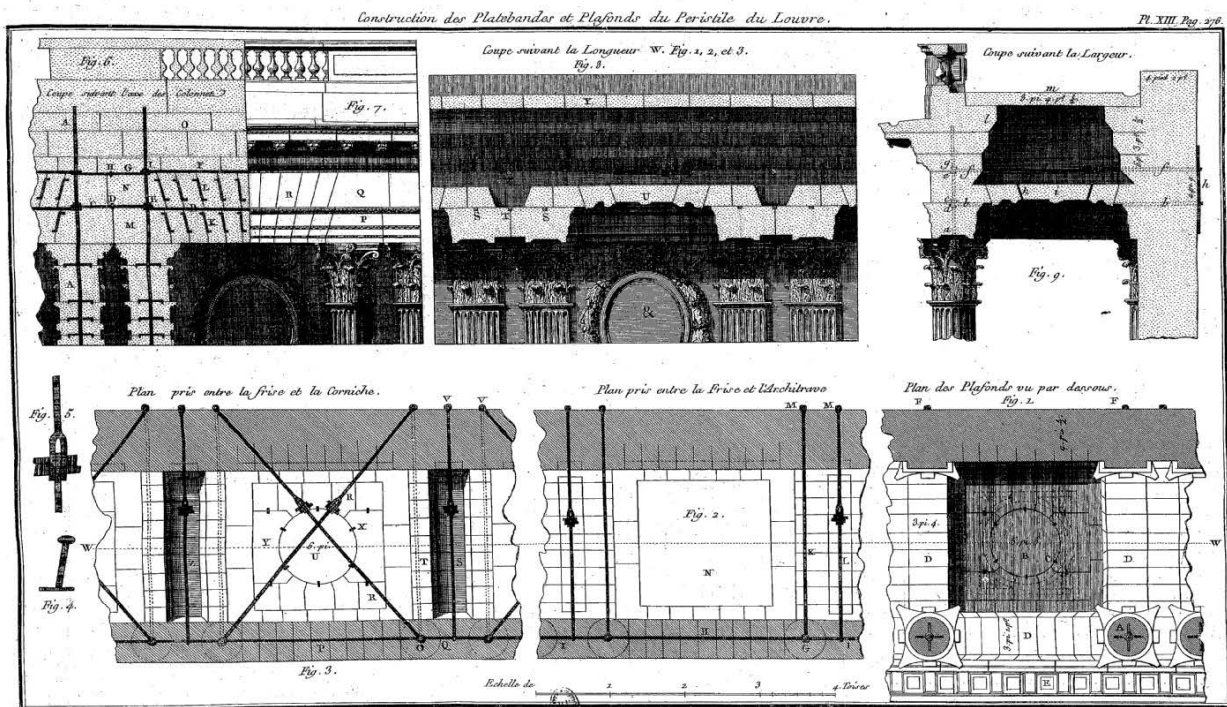
Una vez obtenidos los pesos totales, cuya suma da 128266,69 KN y, calculado el área de la base del tambor que nos da un valor de 208,65 m<sup>2</sup>; pasamos estos datos a N y mm<sup>2</sup> respectivamente para sacar la tensión media a la que está sometido el tambor. Es decir, dividimos 128.266.688,3 N entre 208.652.017,7 mm<sup>2</sup>, lo que nos da 0,61 N/mm<sup>2</sup>. El tambor soporta una tensión media baja.



### 3 Piedra armada y sistema constructivo

#### 3.1 Antecedentes y ejemplos previos

Algunos historiadores del arte han considerado a Rondelet como el inventor de una “especie de mampostería pretensada” por el hierro que consiguió ocultar en el entablamento del peristilo y en los pilares y elementos de la cúpula. Sin embargo, podría considerarse que el precursor e inventor de la fábrica armada es Claude Perrault. En la columnata del Louvre hizo alarde de una solución técnica en la que la piedra resistía las fuerzas de compresión y el hierro las de tracción (fig.1).



3.1. Columnata del Louvre según Patte (1769)

Ya en la antigua Grecia se utilizaba el hierro para evitar el movimiento de los sillares por posibles asentamientos o ante terremotos. Si bien es cierto, eran espigas o grapas que actuaban como elemento auxiliar, nunca como función estructural principal. Además, estos encuentros se trataban con sumo cuidado, protegían los elementos de hierro del efecto de la oxidación. Era fundamental protegerlos debido a que el hierro cuando se oxida aumenta

de volumen y puede romper las piedras. La piedra, aunque tiene un comportamiento muy resistente frente a la compresión no deja de ser un material frágil que puede sufrir microfragmentaciones ante acciones de impacto o como en este caso por variaciones físicas internas. Los constructores griegos y romanos por tanto empleaban una técnica sofisticada para recubrir los hierros con plomo fundido, se cercioraban de cubrir por completo los elementos para evitar el problema de la fractura de las piedras. A lo largo de la historia va a ser frecuente encontrar hierro en las construcciones, pero siempre como apoyo auxiliar. Se pueden encontrar como tirantes, zunchos o cadenas de hierro tanto en bóvedas como en cúpulas.

Ha habido disparidad de opiniones con la cuestión del empleo del hierro como elemento estructural esencial para la estabilidad de un edificio.

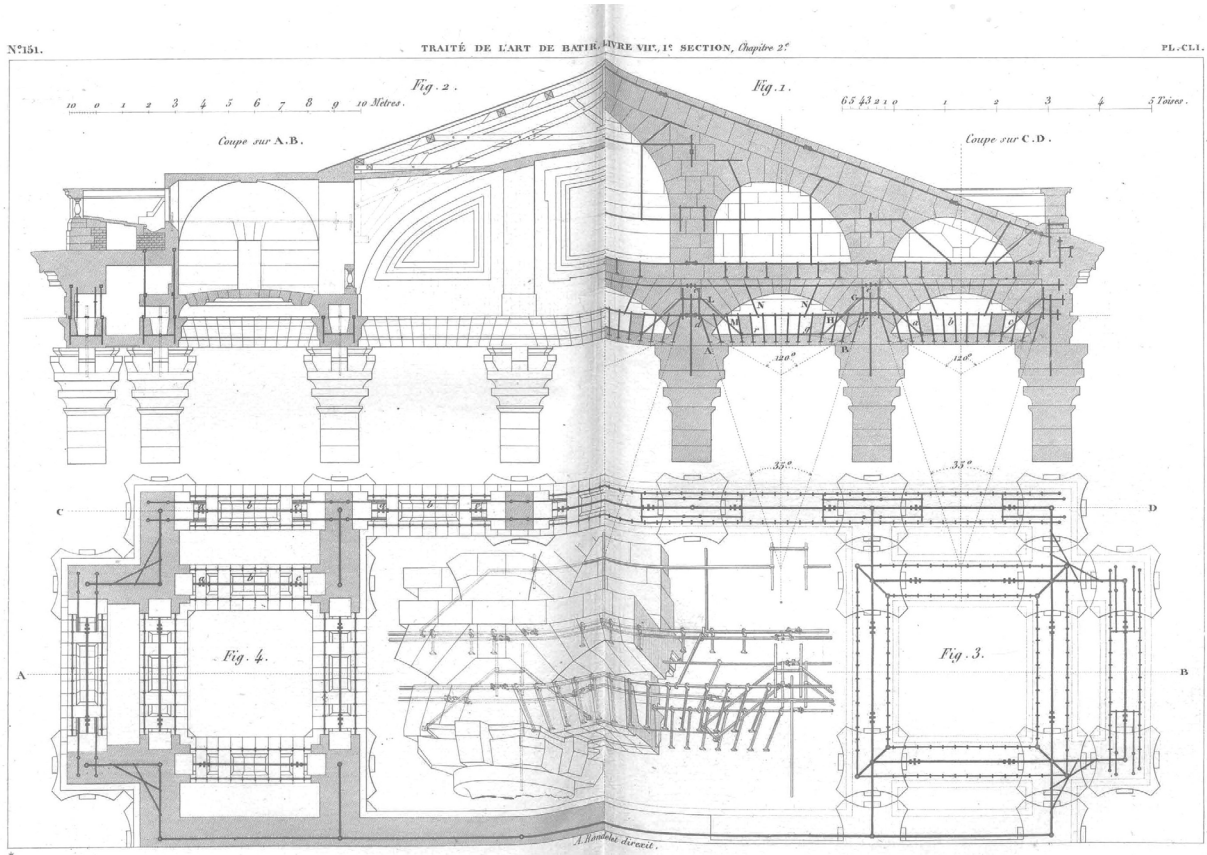
Un caso que resulta curioso es el del arquitecto Pierre Patte, el mismo que se alarmó con el dimensionamiento de los pilares que sostenían la cúpula del Panteón. Se contradice en su discurso. En un primer momento Patte apoya la misma idea de Perrault en sus *Mémoires* y defiende que son los tirantes de hierro los que trabajan a tracción y anulan los empujes horizontales de los arcos. Sin embargo, en 1769 da una visión totalmente contraria, dice lo que venimos comentando; que el hierro no debe emplearse nunca como un elemento principal y sólo debe usarse como algo auxiliar por su aumento de volumen debido a la oxidación.

Otros personajes como Vignola, François Blondel o Christopher Wren han criticado esta cuestión de combinación piedra-hierro. Vignola dice que las fábricas bien entendidas quieren regirse por sí mismas y no estar atadas con “cadenitas”. Wren por su parte manifiesta que atar los muros en vez de construirlos de manera que asienten por sí mismos va contra las reglas de la buena arquitectura. Y Blondel alega más de lo mismo, que en ocasiones se emplean barras de hierro como precaución, pero que no es una solución a largo plazo, ni mucho menos esta manera de construir va a hacer que el edificio se mantenga durante siglos.

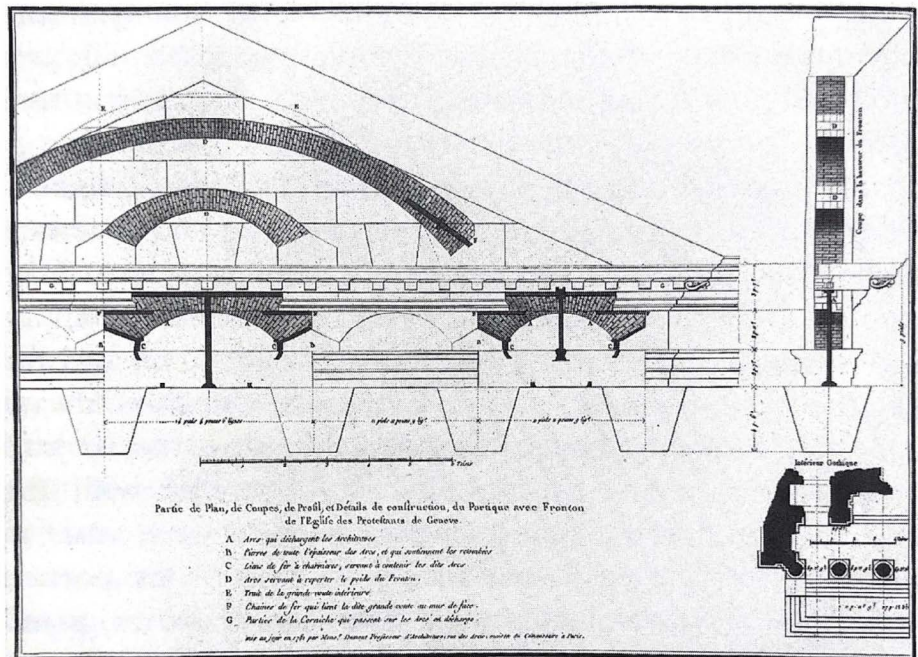
Aun así, tanto Perrault como Soufflot y Rondelet mostraron una gran osadía al defender una solución distinta a las ideas aceptadas sobre la aplicación del hierro, dotándole de un papel principal en el equilibrio de la fábrica.

Rondelet mostró gran fanatismo por introducir una auténtica armadura de hierro, llevando al extremo la solución dada por Perrault en la columna. Puede resultar algo inquietante, sobre todo, porque parece desconocer el comportamiento y la naturaleza de las construcciones de fábrica. Muchos de los hierros que introduce resultan innecesarios y carecen de carácter estructural, cuestión en la que me detendré más adelante.

No podemos estar seguros de cuándo vio Soufflot el trabajo de Benedetto Alfieri en el pórtico de la catedral de Ginebra. Sin embargo, no hay duda de que sus dibujos presentados a la Academia en 1770 inspiraron también a Soufflot a incorporar las armaduras de hierro.



3.2. Sistema de hierros del pórtico del Panteón francés (Rondelet 1830-32)



3.3. Detalle del refuerzo de hierro de la catedral de Ginebra diseñado por Alfieri (Dumont 1781)



### 3.2 Proceso constructivo

Todos los historiadores saben que el sistema de hierros desempeñó un papel fundamental en la construcción del Panteón. Sin embargo, hay que decir que hasta hace relativamente poco se tenía escasa información y detalles limitados acerca de los refuerzos metálicos que llenan todo el edificio.

En los últimos años se ha avanzado considerablemente en el conocimiento de la estructura del edificio, gracias en gran parte al descubrimiento de una colección de planos antiguos. En enero de 1985, por casualidad, el arquitecto jefe que se encargaba de la investigación del edificio descubrió en el propio Panteón un archivo que contenía más de quinientos planos originales del mismo de finales del siglo XVIII y principios del XIX. Para el estudio de las estructuras del Panteón se trata de una documentación única.

Estos planos estaban enrollados y guardados en unos enormes cajones, los cuales estaban ocultos tras dos pesadas estatuas que habían impedido abrirlos durante décadas. Estos planos se encontraban en bastante mal estado, encontrándose incluso signos de putrefacción. Tuvieron que ser restaurados y reproducidos en papel vegetal para ser estudiados y difundidos y posteriormente enviados a los Archivos nacionales.

Este archivo constituye una de las colecciones de dibujos más interesantes encontradas en Francia en su historia de la arquitectura y del arte. Estos planos abarcan desde lo más general como puede ser la evolución capa por capa de la cimentación desde 1758 hasta los detalles de la decoración esculpida de las bóvedas.

Por otro lado, numerosas láminas proporcionan el detalle de las estructuras metálicas que se encuentran ocultas en el interior de la mampostería. Evidencia que se trata de un edificio de “piedra reforzada”, en el que cada piedra está unida a las que la rodean por diversos tipos de refuerzos metálicos. Esta colección constituye una herramienta de trabajo indispensable.

Algunos dibujos famosos publicados por Rondelet también resultan importantes para el entendimiento del proceso constructivo que se llevó a cabo. Rondelet se dedicó prácticamente desde que entró a cargo del proyecto a los problemas prácticos de la construcción.

Soufflot llevaba mucho tiempo preocupado por la cuestión de las grúas, debían contar con suficiente capacidad de elevación y alcance. Cuando se empezaron a construir los pilares principales, el maestro carpintero Jean-Pierre Brullée ideó una gran grúa giratoria que se colocaría en el centro del crucero y serviría para los cuatro pilares (fig. 4). La altura total de la grúa debía ser de 22,25 m, y la de la pluma, de 9,6 m. Su construcción supuso un gasto considerable. Pero no era demasiado eficiente. Incluso con un contrapeso de 363 kg se caía cuando la carga superaba los 907 kg.



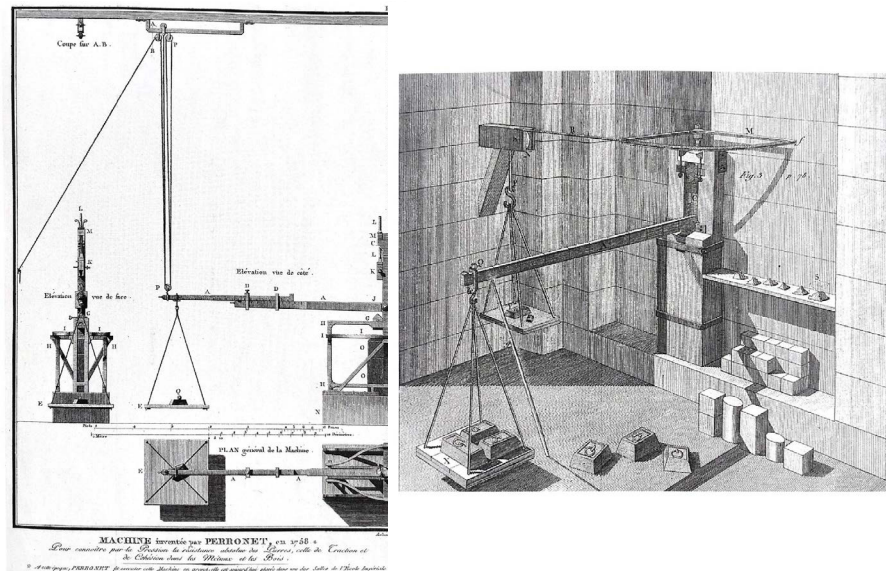
Otra cuestión que se tuvo muy en cuenta durante toda la construcción del Panteón fue la calidad de la piedra empleada. Los ingenieros que se encontraban a la cabeza del *École des Ponts et Chaussées* (Escuela de Puentes y Carreteras) fueron los principales apoyos de Soufflot. Ambos construyeron una máquina para comprobar la resistencia a compresión de piedras y otros materiales.

Todos los implicados eran conscientes de que, aunque las muestras de piedra que se empleaban en los ensayos eran de un tamaño estándar, la importancia de los resultados solo tenía un valor relativo. Los bloques de piedra más grandes se romperían con menos facilidad que los cubos de 10 cm que utilizaron. No obstante, se convencieron de que sus cúpulas podrían sostenerse fácilmente sobre los pilares y columnas que habían diseñado.

Rondelet en 1787 rediseñaría un modelo tras demostrar que cuando la máquina se cargaba por encima de los 90 kg, ésta hacía lecturas totalmente poco fiables.

3.6. Máquina para prueba de resistencia de piedra diseñada por Perronet

3.7. Máquina para prueba de resistencia de piedra diseñada por Rondelet



En el alijo encontrado existen una serie de hojas procedentes del “bureau de Rondelet” que, aunque no proporcionan un registro completo del proceso o progreso del diseño de la cúpula si que se ve la evolución de algunos elementos de la misma.

Los dibujos de la colección principal siguen una especie de secuencia a partir de entonces, con planos de la obra, etapa por etapa, con una gran cantidad de secciones y detalles que permiten ordenar cronológicamente la evolución de la construcción de la cúpula.

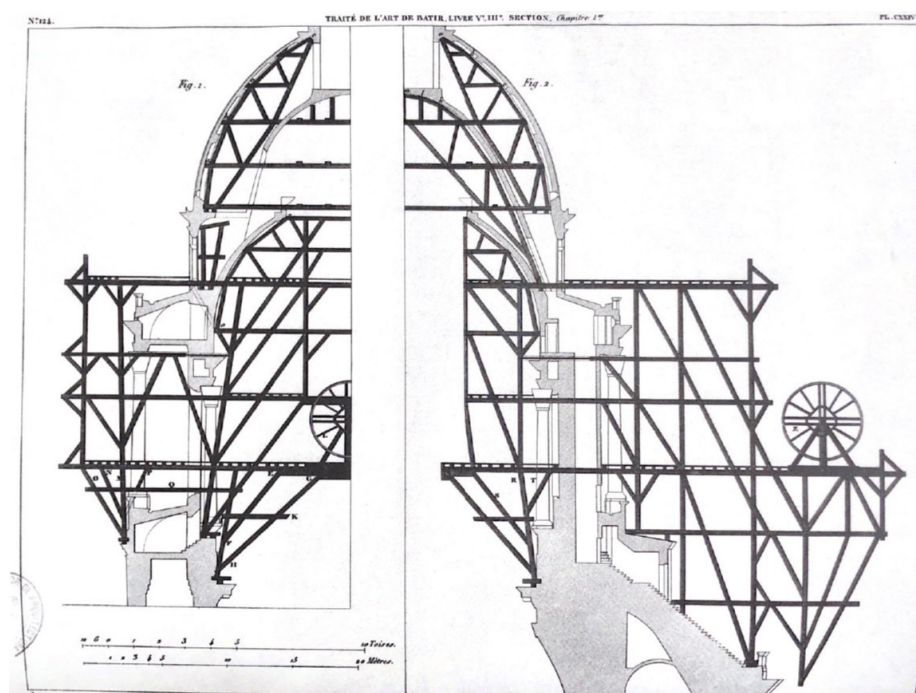
Los primeros trabajos de la cúpula datan de 1776; en una de las hojas se indican las hiladas de piedra que se construirían a la altura del arquitrabe sobre los arcos del crucero. Se encontrarán también dibujos de los años sucesivos que muestran por ejemplo la sección de la parte superior de la cú-

pula interior, planos a diferentes niveles de la cúpula, un plano y sección de la base de las columnas internas de la cúpula...

En 1778 no se estaba trabajando demasiado en la cúpula, aunque se habían hecho algunos preparativos. Durante ese año se tallaron los patrones de las piedras que se utilizarían y se colocaron barras de hierro sobre dos de los arcos del crucero. Además, se realizaron algunos trabajos para rematar las pechinas de la cúpula, y se insertaron hierros aquí y allá en respuesta a las alarmas suscitadas en cuanto al estado de la estructura.

En septiembre de 1780, tras la muerte de Soufflot, se colocaron refuerzos de hierro en los gigantescos arcos catenarios construidos para sostener la columnata exterior de la cúpula. También se construyeron las bases de los cuatro contrafuertes que contenían la escalera. Durante los meses de invierno se trabajó activamente en la reparación de las piedras de los cuatro pilares principales. Desde mayo de 1781 hasta 1784 se interrumpieron las obras.

A finales de 1784 los trabajos se centraron en la construcción de andamios para la talla de la cornisa de la cúpula, cuya construcción empezaría por fin al año siguiente.



3.8. Andamiaje para la construcción de la cúpula (Rondelet 1814)

A mediados de 1785 se cortaron más piedras de muestra bajo la dirección de Rondelet y se colocó la primera hilada, con las piedras ancladas entre sí con hierro y una cadena de hierro por encima. A partir de entonces, la construcción de la cúpula avanzó a buen ritmo. A finales de septiembre se alcanzó la décima hilada del anillo exterior, que serviría de base para la columnata exterior, y se hicieron los agujeros para las clavijas de hierro que sujetarían las treinta y dos columnas que se colocarían encima. Las bases de las columnas se instalaron en octubre y a mediados de noviembre se completó la bóveda semicircular que cubre el espacio que hay entre los anillos interior y exterior de mampostería. El conjunto se cubrió para el invierno y

los bloques de piedra de que no se utilizaron se almacenaron para la temporada siguiente.

Al año siguiente, en 1786, la cornisa de las columnas interiores estaba terminada. En unos meses se colocaron las cadenas de hierro sobre la columnata interior y la exterior, así como las barras de unión de hierro. Había veintitrés cadenas en total en la cúpula; estaban cubiertas de yeso, al igual que los anclajes de hierro que unían las piedras de cada hilada.

En septiembre de 1787 ya se estaba construyendo la bóveda sobre la galería de la columnata y se había establecido la base de la balaustrada.

En abril de 1788 se estableció un nuevo perfil para el ático y se colocó la primera hilada, que empezó a construirse rápidamente. La construcción básica de la cúpula interior se completó en esta fase. La cúpula intermedia comenzó el mes siguiente. Las torres de las escaleras se terminaron, así como los trabajos de la terraza situada sobre la columnata exterior. A principios de junio se había llegado a la cornisa del ático y se había seleccionado piedra especialmente dura para su construcción. A principios de agosto parece que se desmontó gran parte del andamiaje que rodeaba la columnata. Se insertó una cadena de hierro en la parte superior del ático y se colocó la cornisa. La bóveda intermedia ya estaba tomando forma. Las primeras hiladas de la cúpula exterior se colocaron a principios de octubre. La décima hilada se colocó antes del cierre de la obra a finales de noviembre.

Cuando comenzaron de nuevo las obras en 1789, la primera tarea consistió en levantar los andamios necesarios para completar la cúpula exterior. La siguiente etapa de la construcción fue la “escalier à l’anglaise”, la escalera de caracol que va desde la parte superior de la bóveda intermedia hasta la cresta de la cúpula exterior y la linterna. Los trabajos en la cúpula exterior se reanudaron con normalidad el 15 de julio y continuaron a buen ritmo colocando durante ese mes de la hilada 14 a la 24. En la primera semana de octubre se pudo unir la estructura de la torre de la escalera y la cúpula exterior. A mediados de mes se habían colocado las últimas cadenas de hierro de la cúpula exterior y se había empezado a construir la base de la linterna. Los refuerzos de hierro seguían colocándose por todas partes. La linterna se construyó en noviembre. En el interior se siguió trabajando en las escaleras y en la talla ornamental, en particular en los capiteles de las columnas de la linterna.

En enero de 1790 se reforzaron con hierro las cornisas de los cuatro pilares principales y poco después se insertó otra cadena de hierro en la bóveda intermedia. También en esta fase se probaron piedras de diferentes colores para los rosetones de la cúpula interior. Ese mismo mes se estriaron las columnas de los pilares principales. Se alisó la superficie exterior de la cúpula principal y se insertaron los primeros tacos o ménsulas para preparar la colocación de la cubierta de plomo que en un primer momento se planteó de cobre. Durante los meses siguientes se siguió trabajando en el revestimiento de la cúpula, así como en el acabado de las escaleras y las aberturas de las ventanas. Cuando la linterna estaba casi terminada, a principios

de julio de 1790, se desmontaron los andamios que la rodeaban para revelar el esplendor de la silueta de la cúpula.

Las anotaciones en el registro terminan el 6 de noviembre de 1790, la cúpula había tardado cinco años en construirse.





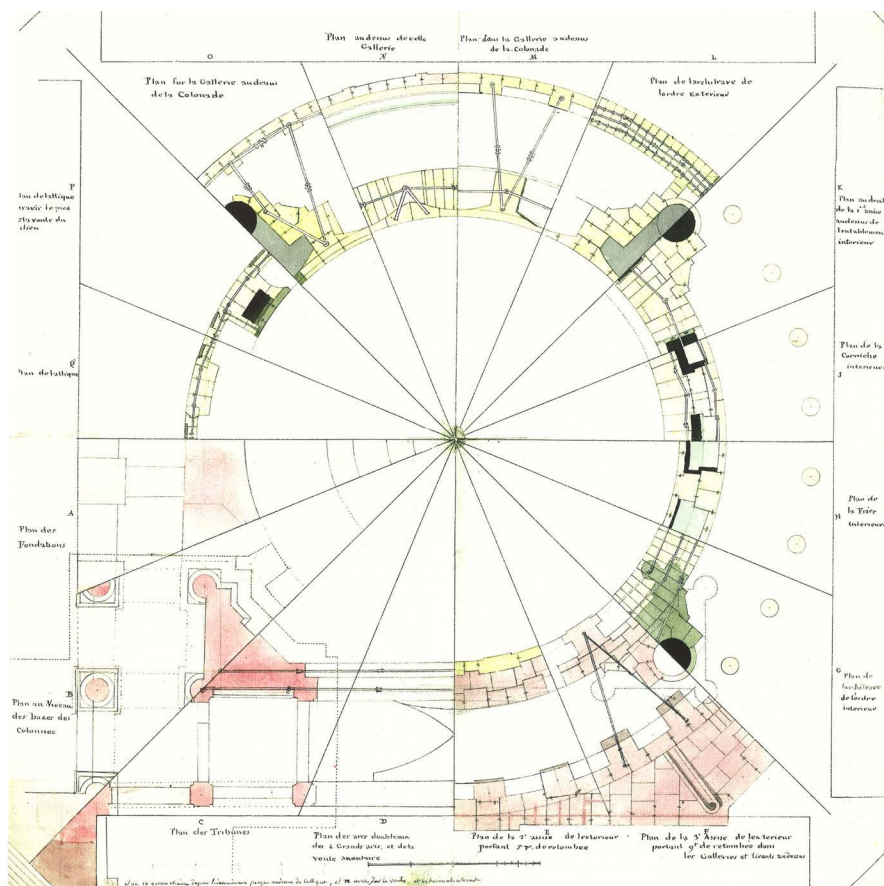
### 3.3 Localización del hierro en la cúpula

Es complicado determinar cuál es la ubicación de todos los refuerzos de hierro que se colocaron en la cúpula del Panteón. Incluso, se han realizado estudios que han requerido muchos medios para encontrar los hierros ocultos con el objetivo de determinar el estado global del monumento.

Uno de los recursos fundamentales que también se emplearon para este estudio fue la documentación encontrada en el famoso alijo que he mencionado previamente.

En la biblioteca de la *École Nationale Supérieure des Pont et Chaussées* se ha conservado un plano de la cúpula que muestra una planta formada por 16 gajos que representan distintas alturas. En la mayoría de los niveles se aprecia la existencia de cadenas y anclajes de hierro.

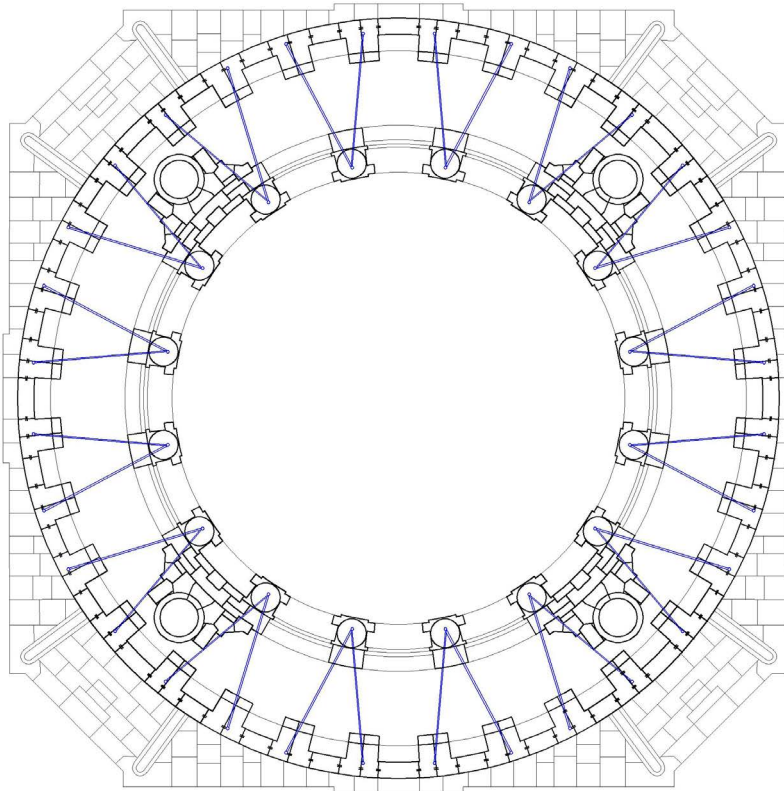
A partir de este plano he podido analizar la ubicación de algunos refuerzos y se deduce que existen tres zonas localizadas con varios anillos de tracción en los que podría pensarse que estos hierros sí realizan algún tipo de esfuerzo. Sin embargo, muchos de estos tirantes parece que no trabajan como deberían negando su naturaleza y que la razón de su colocación fue principalmente ese afán que tenía Rondelet por crear una verdadera armadura de hierro.



3.9. Planta de 16 niveles de la cúpula dibujada por Rondelet

Las sucesivas plantas se ordenarán por alturas, siguiendo los niveles que dibuja Rondelet. Se empieza por el nivel F, correspondiente al tambor de la cúpula.

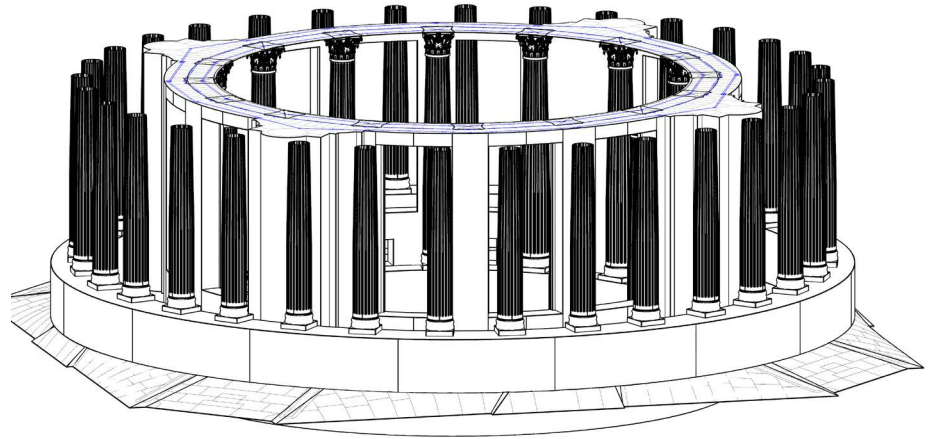
En este primer nivel (F) los tirantes marcados en azul aparentemente no realizan ningún tipo de esfuerzo. En el caso hipotético de que se produjesen empujes, ambos puntos de anclaje situados en los anillos exterior e interior de la cúpula se desplazarían en la misma dirección. En definitiva, el tirante no funcionaría a tracción y por tanto, de qué sirve colocarlo si no va a cumplir la función específica para la cual están diseñados.



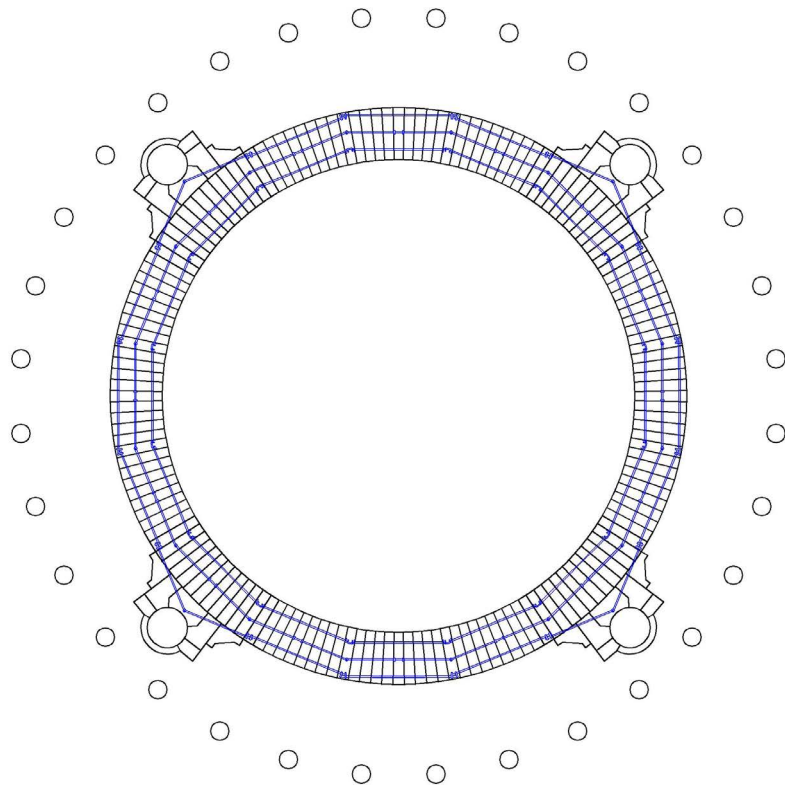
3.10. Planta con hierros por el nivel F a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)

A continuación, se muestran los refuerzos de hierro que podrían considerarse adecuados en términos estructurales. Estos serían los que están ubicados en el interior de los distintos anillos.

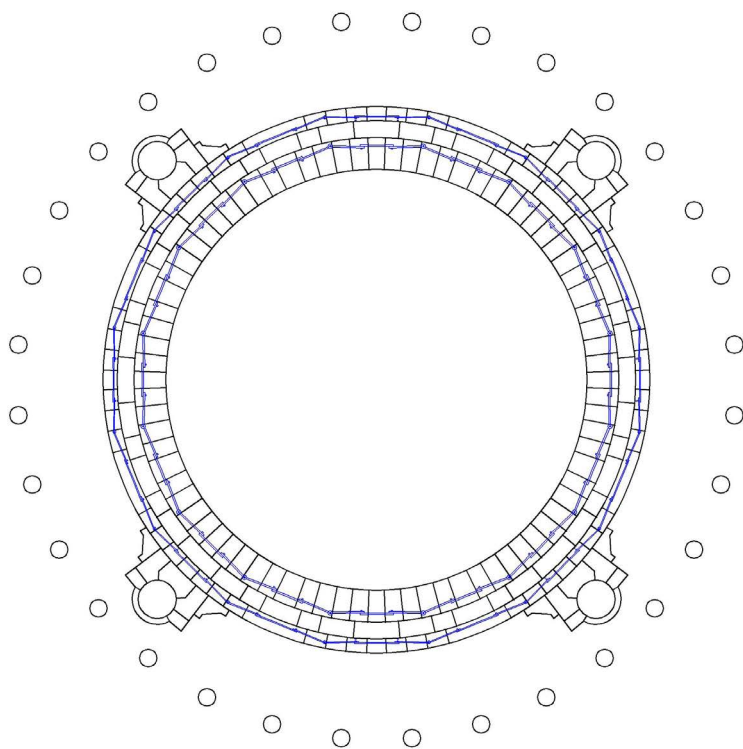
Es inquietante ver la cantidad de cadenas que se introducen en este primer anillo interior. Aparece hierro en cada una de las partes del entablamento: arquitrabe, friso y cornisa. Para entender su localización se muestra una axonometría con los hierros situados en el arquitrabe y, a continuación, las distintas plantas con los hierros.



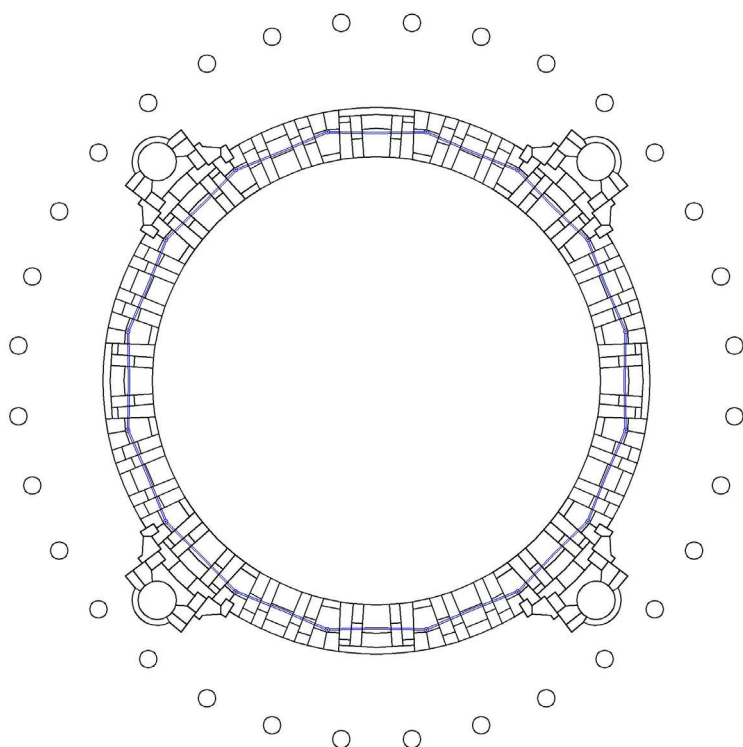
3.11. Axonometría con  
hierros por el nivel G a  
partir del dibujo de Rondelet  
(elaboración propia)



3.12. Planta con hierros por el  
nivel G a partir del dibujo de  
Rondelet (elaboración propia)

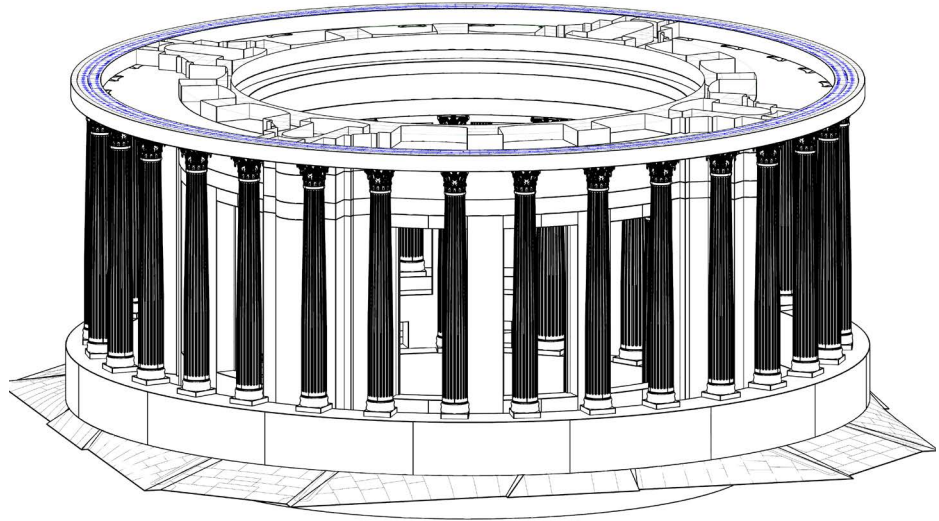


3.13. Planta con hierros por el nivel J a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)

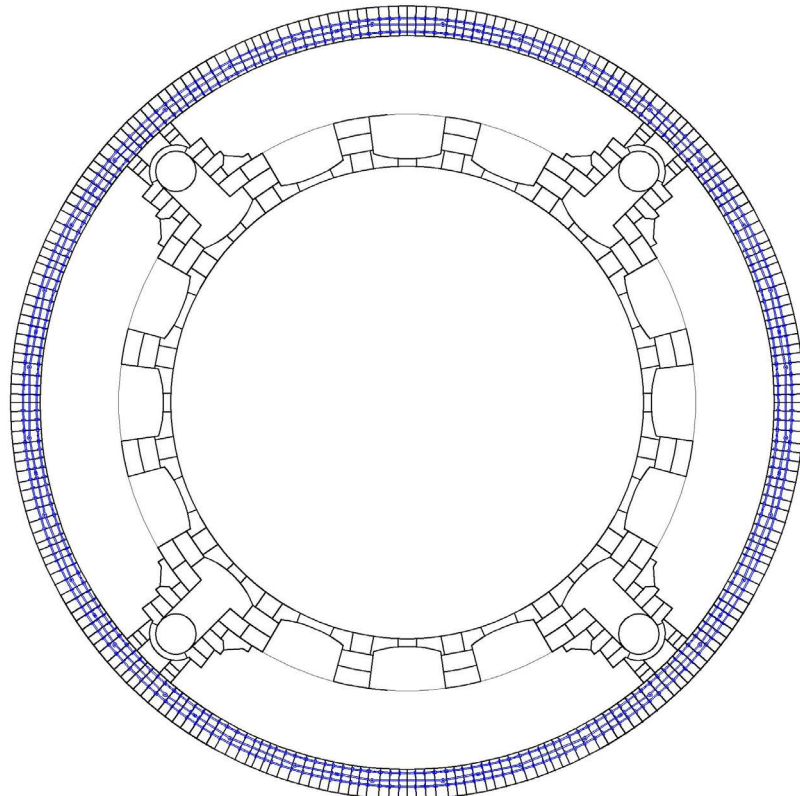


3.14. Planta con hierros por el nivel K a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)

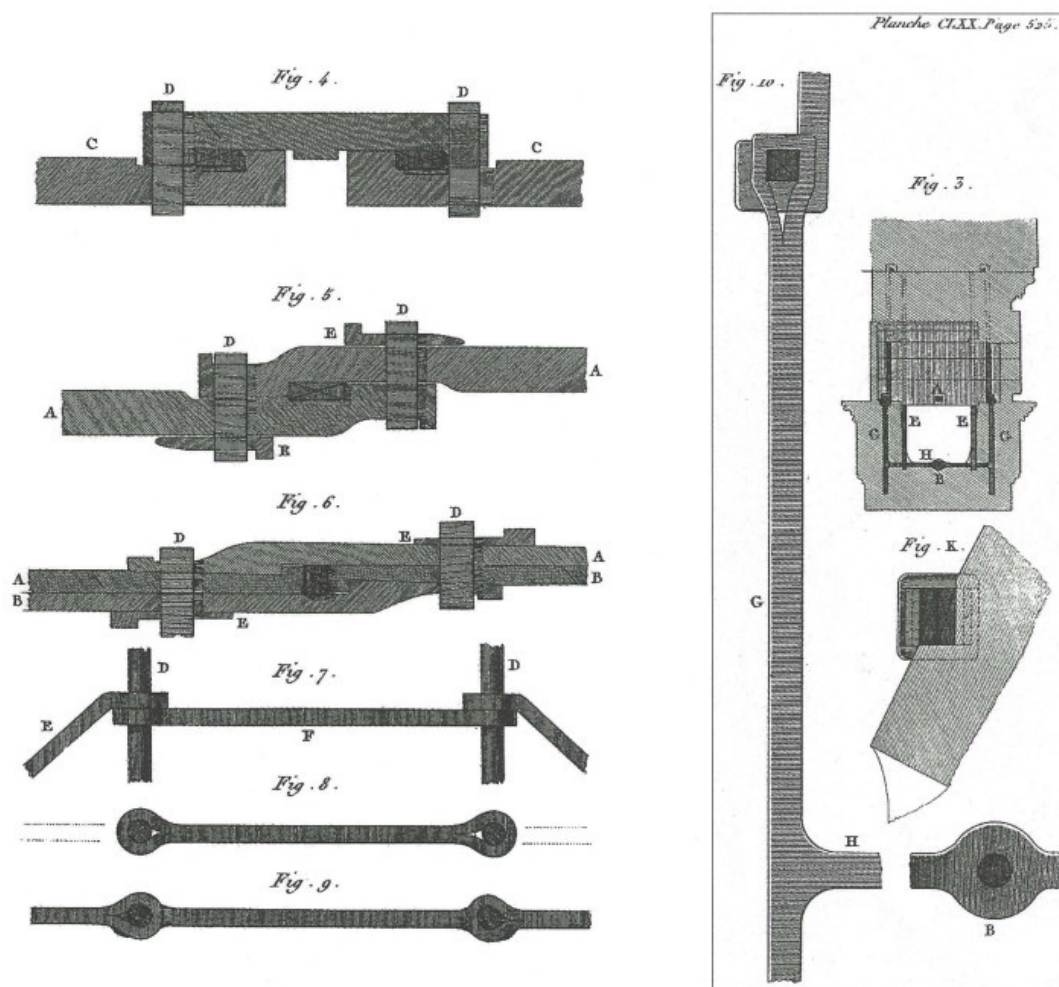
En este otro caso ocurre lo mismo. Unas cadenas de hierro se colocan en el arquitrabe exterior para evitar los empujes de la cúpula. Se muestra tanto en axonometría como en planta.



3.15. Axonometría con hierros por el nivel L a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)



3.16. Planta con hierros por el nivel L a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)

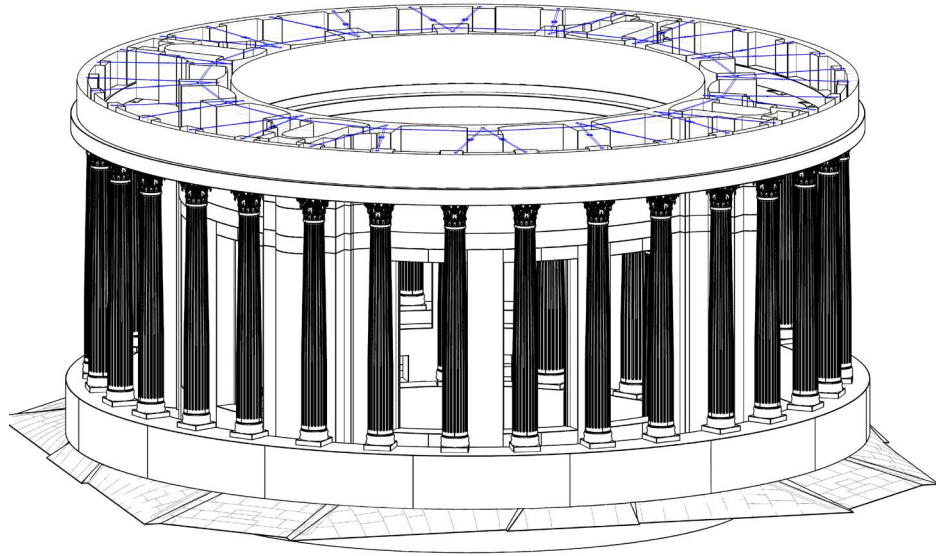


3.17. Detalle de las armaduras para la iglesia de Sainte-Geneviève (Rondelet, 1814)

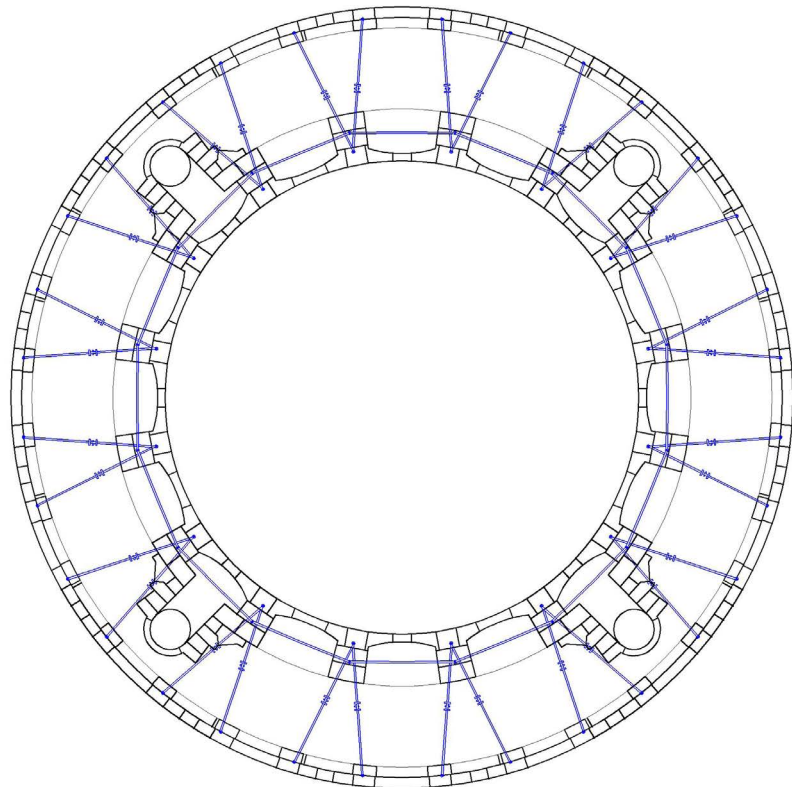


3.18. Cadena de hierro en uno de los arcos de la iglesia

En la galería que hay entre ambos anillos sobre la columnata exterior vuelven a aparecer barras de hierro que atraviesen el espacio de un lado a otro. Al dibujarlo me parecía un poco extraña esta localización y no acababa de entender la razón de colocarlos ahí. Dudé de si verdaderamente se habrían colocado estos hierros durante la construcción o si simplemente fueron unos diseños que se hicieron sobre el dibujo. En la imagen (fig. 21) se aprecia que efectivamente existen esos hierros atravesando la galería.



3.19. Axonometría con hierros por el nivel M a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)

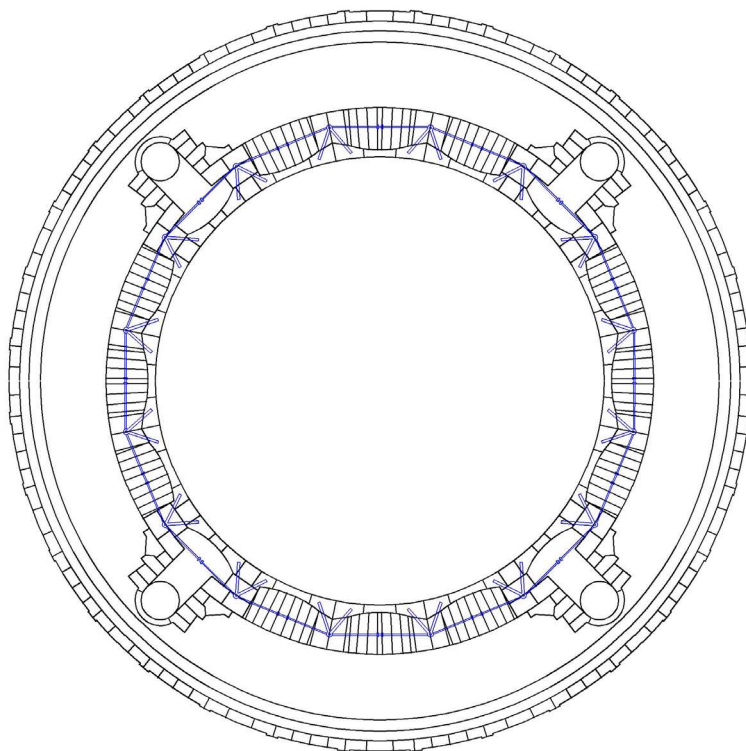


3.20. Planta con hierros por el nivel M a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)

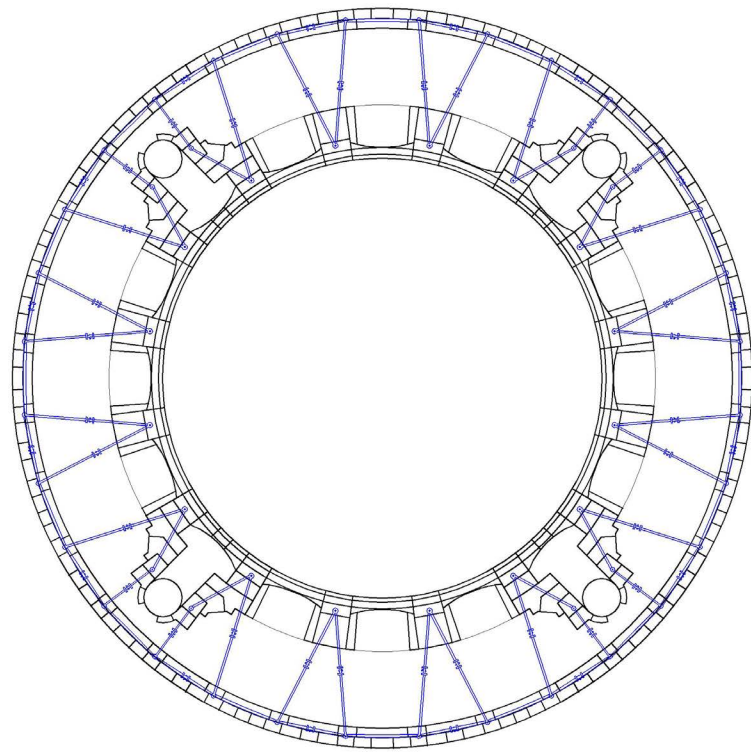


3.21. *Galería intermedia entre anillos exterior e interior sobre la columnata con hierros atravesándola*

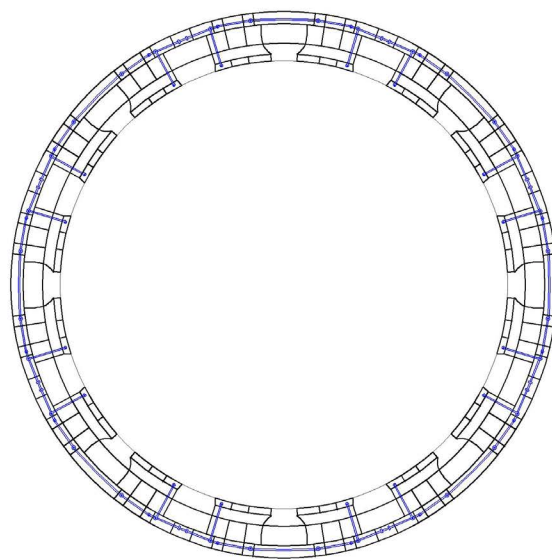
Se puede extraer el mismo razonamiento de las plantas sucesivas en las que va alternándose la disposición de las barras. En ocasiones, se ubican en los anillos funcionando a tracción y otras veces se sitúan atravesando los espacios intermedios sin realizar ningún tipo de esfuerzo.



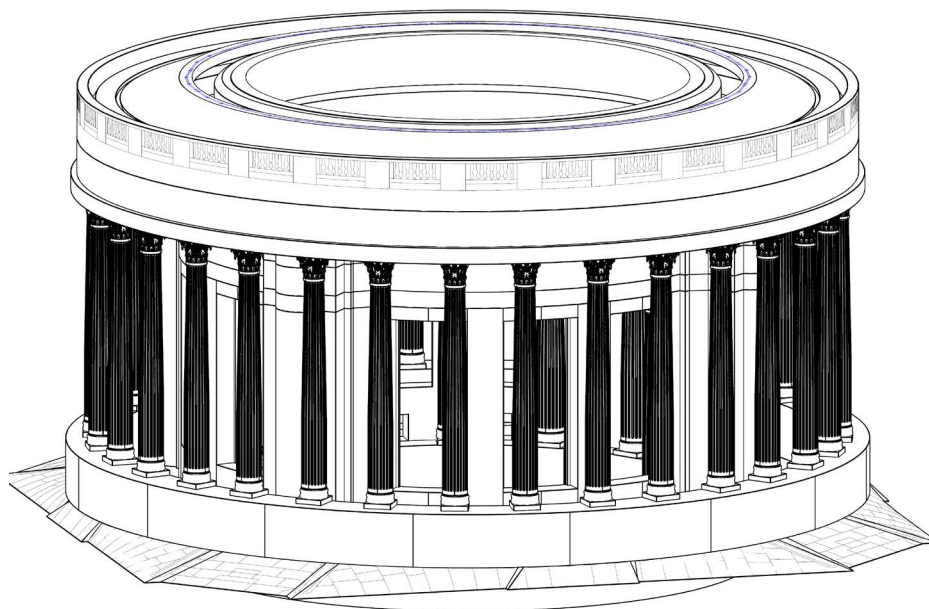
3.22. *Planta con hierros por el nivel N a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)*



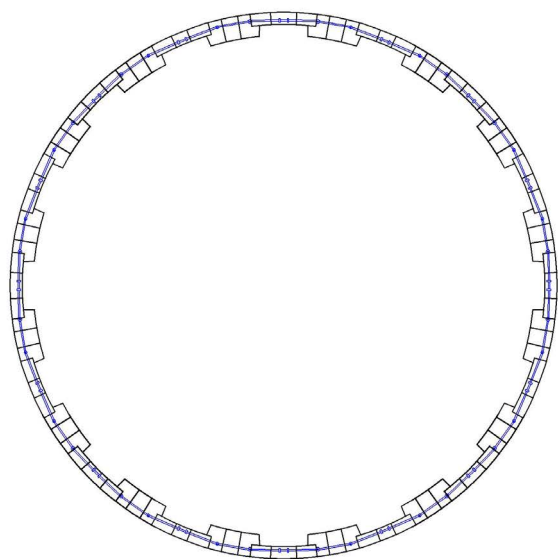
3.23. Planta con hierros por el nivel O a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)



3.24. Planta con hierros por el nivel P a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)



3.25. Axonometría con hierros por el nivel Q a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)



3.26. Planta con hierros por el nivel Q a partir del dibujo de Rondelet (elaboración propia)





### 3.4 Problemas por el uso del material

El Panteón de París, prácticamente desde sus inicios, ha sido un proyecto muy polémico por el extremo técnico-constructivo al que se llevó. Al margen de los numerosos debates que suscitó este edificio, durante su construcción tuvo problemas en las piedras de sus cuatro pilares principales, lo que preocupó incluso a su arquitecto. Además, este suceso paralizó las obras durante bastante tiempo, ya que se tuvieron que trepanar los pilares para quitar las cuñas que se habían introducido entre los sillares de piedra.

Sin embargo, el problema actual que ha llevado durante las últimas décadas a realizar estudios globales del edificio ha sido la caída de fragmentos de piedra, siendo probablemente el hierro la causa principal.

Es lógico pensar que todos los monumentos históricos, y más aún un edificio tan imponente como el Panteón requiera de actuaciones de reparación y mantenimiento, pero tras más de 250 años desde que se decretó su construcción se vuelve a plantear el debate acerca de la seguridad, esta vez por otra cuestión que nada tiene que ver con las proporciones de los pilares.

Parece curioso pensar que ya en la Antigüedad clásica tuviesen tan interiorizado el extremo cuidado con el que se debía tratar la combinación piedra-hierro. Y que incluso a pesar de las continuas opiniones de arquitectos e ingenieros reconocidos Soufflot y Rondelet construyesen una auténtica armadura de hierro. Además, basaron su diseño únicamente en su intuición estructural y en algunos cálculos realizados por ingenieros como Gauthey. La complejidad de cálculos estructurales que se plantean en las estructuras modernas comparado con los que se realizaron entonces da también una visión de la magnitud de desconocimiento que tenían acerca de su comportamiento a largo plazo.

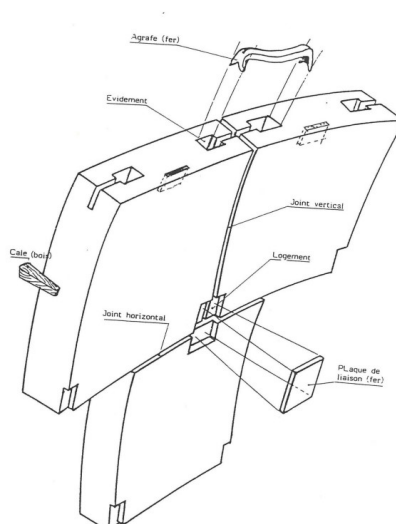
Esta combinación de materiales ha causado daños muy graves a toda la mampostería, ya no sólo en las zonas localizadas, sino que ha provocado movimientos a escala global que afectan al conjunto del edificio.

Ya en 1985, el arquitecto jefe de monumentos históricos Hervé Baptiste realizó una investigación muy exhaustiva debido a los numerosos registros que se habían realizado de desprendimientos de piedras. Todos estos fragmentos se caían de manera arbitraria amenazando a la seguridad de las personas, por lo que se tomó la decisión de cerrar el Panteón al público hasta que se encontrase alguna solución.

Observaron durante estos estudios que en el fondo de los huecos de las piedras que se habían desprendido había unos refuerzos metálicos oxidados. Como ya he comentado en varias ocasiones, la oxidación de estos hierros provocó su hinchazón y por tanto la fragmentación de la piedra.

Se clasificó incluso el tipo de armadura metálica que existía, algunos anclajes más visibles que otros.

Tras estos estudios no se hizo nada para solucionar los desprendimientos de piedra, se colocaron redes bajo las bóvedas para recoger los posibles



3.27. Fractura de piedra con refuerzo de hierro

3.28. Esquema de las grapas de hierro entre sillares de piedra

fragmentos de piedra que pudiesen caer. Sin embargo, la zona de la cúpula tuvo que mantenerse cerrada por la gran altura desde la que podían desplomarse las piedras, ya que estas redes no aguantarían el impacto y de nada servirían.

En 2013 el arquitecto Carlo Blasi, junto con Coisson e Ioro publicó *Fractures and stability of the French Panthéon*, retomando la investigación que todavía no había planteado una solución a las fracturas de las piedras.

Blasi reafirmó lo siguiente: “The presence of iron clamps, indeed, produces, under long time loads, stress concentrations in the stone and consequent fractures” (la presencia de grapas de hierro en efecto, produce, bajo cargas de larga duración, concentraciones de tensión en la piedra y las consiguientes fracturas).

También se determinó que los elementos estructurales con más problemas y deformaciones eran los cuatro grandes arcos principales que sostienen la columnata exterior del tambor, que además de sufrir grandes empujes horizontales estáticos soportan acciones de viento.

La solución perfecta sería eliminar todos los hierros que existen en el Panteón, pero, como esto es imposible sin destruir el edificio el equipo propuso una técnica experimental para tratar de contrarrestar los empujes y así impedir nuevas fracturas.

Los resultados fueron globalmente positivos. El equipo a pesar de no poder prever posibles fenómenos que se hacen visibles a largo plazo demostró gran capacidad y conocimiento de la estática. Al fin y al cabo, es difícil entender en todo su conjunto el comportamiento de las estructuras históricas, sobre todo porque son fenómenos muy lentos que se ponen de manifiesto con el paso del tiempo. Además, la fábrica no deja de ser un material discontinuo, heterogéneo y anisótropo que se analiza desde hipótesis que simplifican el problema.



3.29. Desprendimientos en uno de los arcos formeros



3.30. Fragmentaciones de piedras



## Conclusiones

Se ha analizado en profundidad la cúpula del Panteón respondiendo a muchas de las preguntas que han ido surgiendo durante el proceso previo de investigación.

Primero de todo, podemos afirmar que la alarma que provocó Patte acerca del supuesto mal dimensionamiento de los pilares planteados por Soufflot carece de fundamento. Se encuentran varias respuestas a su memoria que demuestran en sus cálculos que los soportes pueden aguantar una cúpula más grande incluso que la del diseño de Soufflot. Además, se hace evidente que en ocasiones sus hipótesis son erróneas. En primer lugar, las proporciones que tiene en cuenta para la cúpula no son las del proyecto de Soufflot, sino unas que intuye él mismo a partir de otros proyectos que ha debido ver para el edificio. En segundo lugar, parte de las reglas de Fontana para demostrar su teoría, que no dejan de ser unas proporciones que se han recogido de construcciones que ya existen y a las que se les han dado unos espesores mucho mayores de los que necesitan para favorecer a la seguridad. Además, combina estas reglas incoherentemente con otras teorías que se desarrollan en estos momentos.

Sin embargo, un aspecto que sorprende es que a pesar de la monumentalidad de la cúpula y de la dificultad que ésta representa Rondelet afirme con tanta seguridad que las bóvedas no tienen empuje. En parte podría entenderse la preocupación que sentía Patte.

Siguiendo con esta cuestión y a partir del cálculo de estabilidad que se ha realizado podemos asegurar que la cúpula se encuentra en equilibrio: existe una línea de empuje mínimo con suficiente coeficiente geométrico de seguridad en la base del tambor, es decir, el tambor es estable con los empujes de la cúpula que actúan sobre él ( $c.g.s > 2$ ).

Además, resulta evidente que si se ha mantenido en pie durante más de 200 años el dimensionamiento de la cúpula nunca fue un problema.

Por otro lado, tras el cálculo se confirma la hipótesis que planteamos acerca del material fábrica “las tensiones son bajas”:  $\sigma_m = 0,61 \text{ N/mm}^2$

En cuanto a la cuestión de la piedra armada podemos determinar varias cosas. La cantidad de hierro que se introduce en el Panteón es un ejemplo de afán llevado al extremo, muchos de los hierros no están si quiera justificados y se colocan de manera intuitiva. Tras haber analizado la localización de algunos hierros situados en la cúpula se comprueba efectivamente que los tirantes metálicos no siempre actúan como deberían, es decir, no realizan esfuerzos de tracción. Por otro lado, con el tiempo se han evidenciado las consecuencias de la combinación de la piedra y el hierro, que ha acabado por fracturar la piedra y provocar desprendimientos. Podemos afirmar

pues que la elección del material no fue ni mucho menos adecuada y que además, estos refuerzos no eran necesarios para soportar los empujes de la cúpula, como se ha demostrado en los cálculos.





# Bibliografía

- Bibliothèque nationale de France. (n.d.). Retrieved May 31, 2024, from <https://gallica.bnf.fr/accueil/es/content/accueil-es?mode=desktop>
- Bach, Richard. F. (1917). *The Dome of the Pantheon, Paris. A study of its structural system*. The Architectural Forum, 27, 91–99.
- Baptiste, H. (1996). *Dix ans d'investigations au Panthéon: au chevet d'un grand malade*. Monumental, 40–61.
- Blasi, C., Coisson, E., & Iori, I. (2013). *Fractures and stability of the French Panthéon*. International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming.
- Braham, A. (1971). *Drawings for Soufflot's Sainte Geneviève*. The Burlington Magazine, 113(823), 582–592. <http://www.jstor.com/stable/876762>
- Gallet, M. M., & Ternois, D. (1980). *Soufflot et son temps*. Édition de la caisse nationale des monuments historiques et des sites.
- Gauthey, É.-M. (1798). *Dissertation sur les dégradations du Panthéon françois*. L'imprimerie de H.L. Perrouneau.
- Graefe, R. (2021). *The catenary and the line of thrust as a means for shaping arches and vaults*. Ernst & Sohn.
- Heyman, J. (1985). *The crossing piers of the French Panthéon*. The Structural Engineer, 63A, 230–234.
- Heyman, J. (1999). *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, J. (2022). *Equilibrio de cáscaras*. Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, S. (2021). *Block models of the masonry arch and vault* (pp. 31–78). Ernst & Sohn.
- Huerta, S. (2023). *Claude Perrault, la columnata del Louvre y la invención de la fábrica armada*. Revista de Historia de La Construcción, 3, 51–78. <https://doi.org/10.4995/rdhc.2023.20936>
- Iborra Bernad, F. (2018). *De la basílica vitruviana a la basílica ilustrada*. Universidad Politécnica de Madrid. <http://hdl.handle.net/10251/120598>
- López Manzanares, G. (2003). *The XVIIIth century: Carlo Fontana's expertises*. Instituto Juah de Herrera. [http://refhub.elsevier.com/S2095-2635\(22\)00078-4/sref78](http://refhub.elsevier.com/S2095-2635(22)00078-4/sref78)
- López Manzanares, G. (2005). *The relation between theory and practice in the construction of Sainte-Genève church in Paris: Patte's contribution*. In Theory and practice of construction: knowledge, means, models (Vol. 2, pp. 773–783).
- López Manzanares, G. (2007). *La contribución de E.M. Gauthey al desarrollo de la teoría de cúpulas: el informa de 1771 sobre la estabilidad de la iglesia de Santa*

*Genoveva en París*. In Arenillas, M., et al. (Eds.), *Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la construcción*. Instituto Juan de Herrera. (pp.587-589). [http://refhub.elsevier.com/S2095-2635\(22\)00078-4/sref78](http://refhub.elsevier.com/S2095-2635(22)00078-4/sref78)

López-Manzanares, G. M. (2022). *Technical reports and theoretical studies about the structural behaviour of masonry domes in the 18th century*. *Frontiers of Architectural Research*, 12(1), 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.06.012>

Middleton, R., & Matuszek-Baudouin, M.-N. (2007). *Jean Rondelet: the architect as technician*. Yale University Press.

Patte, P. (1770). *Mémoire sur la construction de la coupole, projetée pour couronner la nouvelle église de Sainte-Geneviève*. P.-F. Gueffier.

Pérouse de Montclos, J.-M. (2004). *Jacques-Germain Soufflot*. Centre des monuments nationaux Monum, Éditions du patrimoine.

Rondelet, J.-B. (1797). *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français*. Du Pont. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bd6t57376210?rk=21459;2>

Rondelet, J.-B. (1814). *Traite theorique et pratique de l'art de batir*. A. Rondelet fils.

Rondelet, J.-B. (2001). *L'art de bâtir*. Instituto Juan de Herrera.





## Procedencia de las ilustraciones

[Párrafo Ilustraciones: modelos de imagen escaneada sin más, imagen retocada y sitio de Internet].

- 1.1. Tomado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b10302743t/fi.item>; consultado el 26.05.2024
- 1.2. Tomado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b530622941#>; consultado el 25.05.2024
- 1.3. Tomado de Federico Iborra Bernad, *De la basilica vitruviana a la basilica ilustrada* (2018), figura 7, página 4.
- 1.4. Tomado de Federico Iborra Bernad, *De la basilica vitruviana a la basilica ilustrada* (2018), figura 8, página 4.
- 1.5. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 1, página 6.
- 1.6. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 129, página 96.
- 1.7. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 130, página 96.
- 1.8. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 131, página 97.
- 1.9. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 126, página 94.
- 1.10. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 127, página 95.
- 1.11. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 128, página 95.
- 1.12. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 135, página 99.
- 1.13. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 132, página 98.
- 1.14. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 133, página 98.
- 1.15. Tomado de Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Jacques Germain Soufflot* (2004), figura 133, página 98.
- 1.16. Tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 78, página 69.
- 1.17. Tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 79, página 69.
- 1.18. Tomado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k133552r?rk=21459;2#>; consultado el 25.05.2024

- 1.19. Tomado de Gema M. López Manzanares, *Technical reports and theoretical studies about the structural behaviour of masonry domes in the 18th century* (2022), figura 4, página 6.
- 1.20. Tomado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k133552r?rk=21459;2#>; consultado el 25.05.2024
- 1.21. Tomado de <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/437253>; consultado el 25.05.2024
- 1.22. Tomado de <https://www.geographicus.com/mm5/cartographers/gautheyemiland.jpg>; consultado el 25.05.2024
- 1.23. Tomado de Émiland-Marie Gauthey, *Dissertation sur les dégradations du Panthéon français* (1798), página 134
- 2.1. Tomado de Rainer Graefe, *The catenary and the line of thrust as a means for shaping arches and vaults* (2021), figura 3.9, página 87.
- 2.2. Tomado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k133552r?rk=21459;2#>; consultado el 25.05.2024
- 2.3. Tomado de Émiland-Marie Gauthey, *Dissertation sur les dégradations du Panthéon français* (1798), página 15
- 2.4. Tomado de Jean Rondelet, *Traite theorique et pratique de l'art de batir* (1814), nº 194
- 2.5. Tomado de Jean Rondelet, *Traite theorique et pratique de l'art de batir* (1814), nº 195
- 2.6. Tomado de Hervé Baptiste, *Dix ans d'investigations au Panthéon* (1996), página 40
- 2.7. Tomado de Jean Rondelet, *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français* (1797), planche 1
- 2.8. Tomado de Jean Rondelet, *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français* (1797), planche 2
- 2.9. Elaboración del autor a partir de un original tomado de Jean Rondelet, *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français* (1797), planche 2,3
- 2.10. Elaboración del autor a partir de un original tomado de Jean Rondelet, *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français* (1797), planche 1,2,3
- 2.11. Elaboración del autor a partir de un original tomado de Jean Rondelet, *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon français* (1797), planche 1,2,3
- 2.12.-2.20. Elaboración del autor a partir de la teoría de las estructuras de fábrica desarrollada por el profesor Heyman
- 3.1. Tomado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5701519t/f314.item#>; consultado el 26.05.2024
- 3.2. Tomado de Jean Rondelet, *Traite theorique et pratique de l'art de batir* (1814), página 450
- 3.3. Tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 52, página 56.
- 3.4. Tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 72, página 65.
- 3.5. Tomado de Jean Rondelet, *l'art de batir* (2001), página 179.
- 3.6. Tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 69, página 65.

- 
- 3.7. Tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 71, página 65.
- 3.8. Tomado de Jean Rondelet, *l'art de bâtir* (2001), página 128.
- 3.9. Tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 71, página 65.
- 3.10.-3.16. Elaboración del autor a partir de original tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 71, página 65.
- 3.17. Tomado de Hervé Baptiste, *Dix ans d'investigations au Panthéon. Au chevet d'un grand malade* (1996), página 46.
- 3.18. Tomado de Hervé Baptiste, *Dix ans d'investigations au Panthéon. Au chevet d'un grand malade* (1996), página 49.
- 3.19. Elaboración del autor a partir de original tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 71, página 65.
- 3.20. Elaboración del autor a partir de original tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 71, página 65.
- 3.21. Tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 108, página 96.
- 3.22.-3.26. Elaboración del autor a partir de original tomado de Middleton y Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician* (2007), figura 71, página 65.
- 3.27. Tomado de Hervé Baptiste, *Dix ans d'investigations au Panthéon. Au chevet d'un grand malade* (1996), página 45.
- 3.28. Tomado de Hervé Baptiste, *Dix ans d'investigations au Panthéon. Au chevet d'un grand malade* (1996), página 49.
- 3.29. Tomado de Hervé Baptiste, *Dix ans d'investigations au Panthéon. Au chevet d'un grand malade* (1996), página 45.
- 3.30. Tomado de C. Blasi, E. Coïson, I. Iori, *Fractures and stability of the French Panthéon* (2013), figura 5, página 6.

