

L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME



L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - MÉTHODE D'ÉTUDE



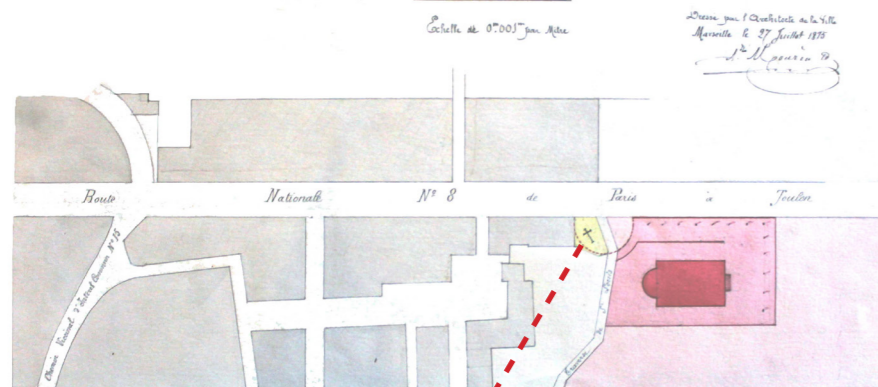
ÉTUDE DES FISSURATIONS DU DÔME DE ST LOUIS

- 1.** HISTORIQUE
- 2.** DÉFINITION GÉOMÉTRIQUE DE LA FORME
- 3.** IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DE LA FORME - ÉTUDE DE LEUR MISE EN ŒUVRE
- 4.** ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU DÔME
- 5.** PHÉNOMÉNOLOGIE DE FISSURATION

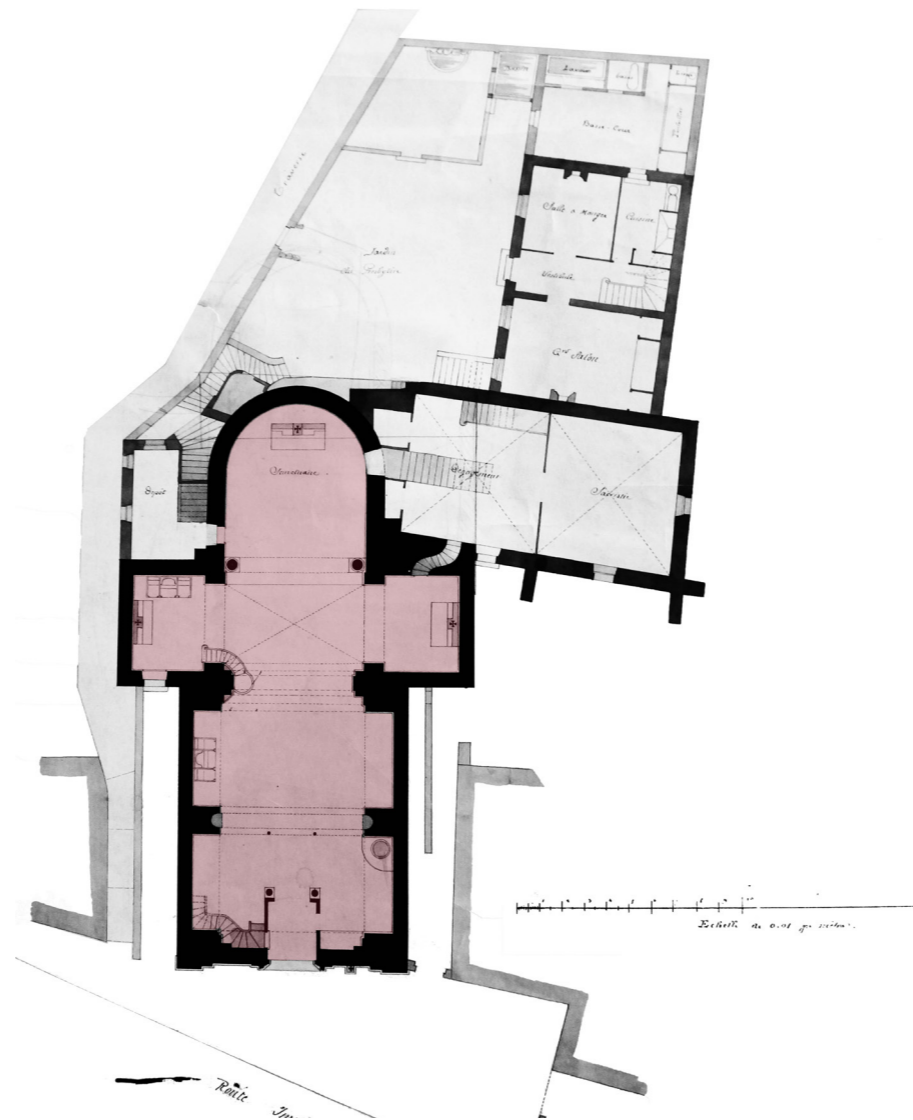
1 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - HISTORIQUE

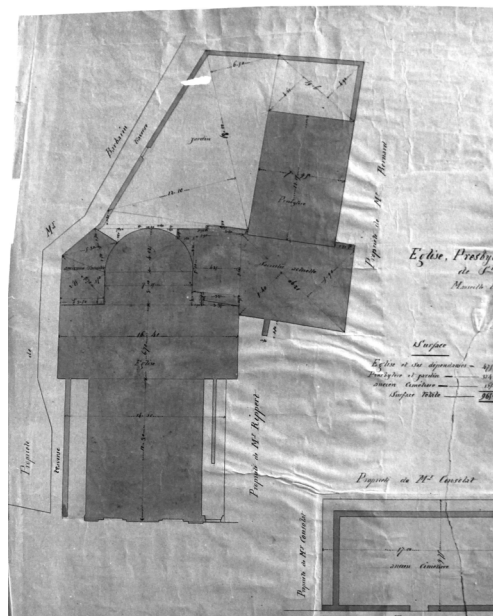
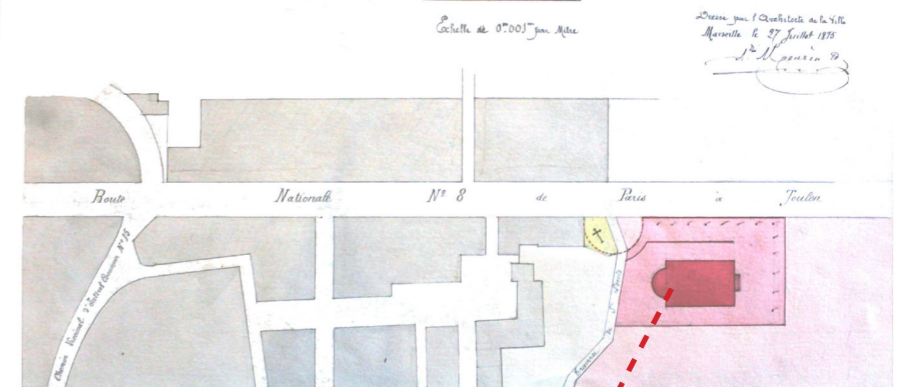
AVANT-PROJET de reconstruction de l'église du quartier de St-Louis.



EGLISE DE S^T-LOUIS.
PLAN



AVANT-PROJET de reconstruction de l'église du quartier de St-Louis.

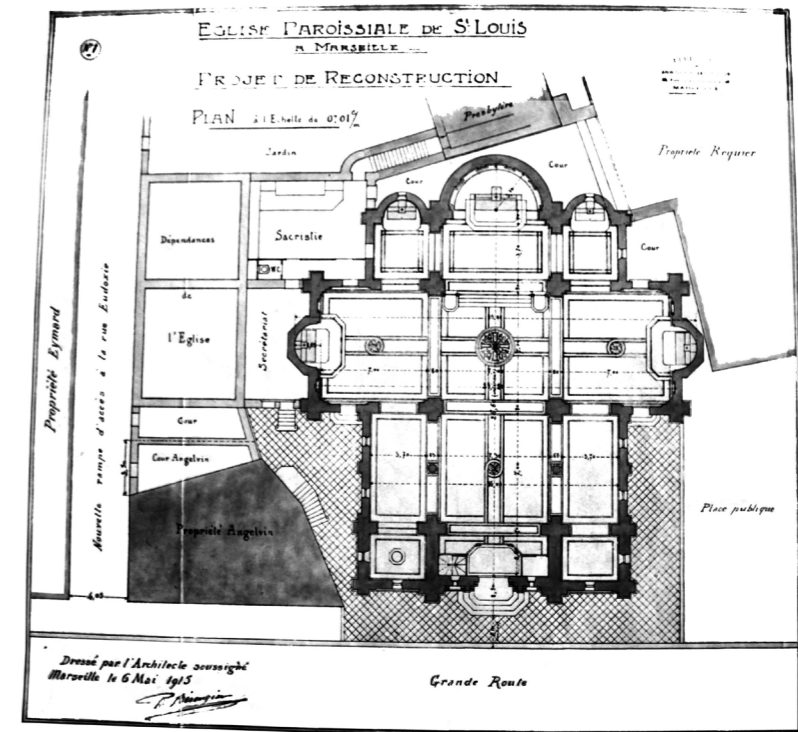


Capacité de 300 places
Surface: 478m²

Composition classique d'une église basilicale:
nef unique centrale en croix latine: opposition avec le plan centré de la future reconstruction.

Matériaux: appareillage en pierre
voûte en berceau et pilastre

Paroisse dédié au roi Louis IX, dit Saint Louis après sa canonisation en 1297.
Son lieu d'implantation est resté le même jusqu'au XXème siècle.



Projet de reconstruction de la paroisse Saint-Louis par l'architecte P. Berengier en 1915. La guerre suspendra ce projet encore rattaché à l'architecture traditionnelle. On peut le lire dans sa composition morphologique et aux matériaux utilisés

CONSTRUCTION DE LA
PAROISSE ST LOUIS

1611

RESTAURATION DE LA
PAROISSE ST LOUIS

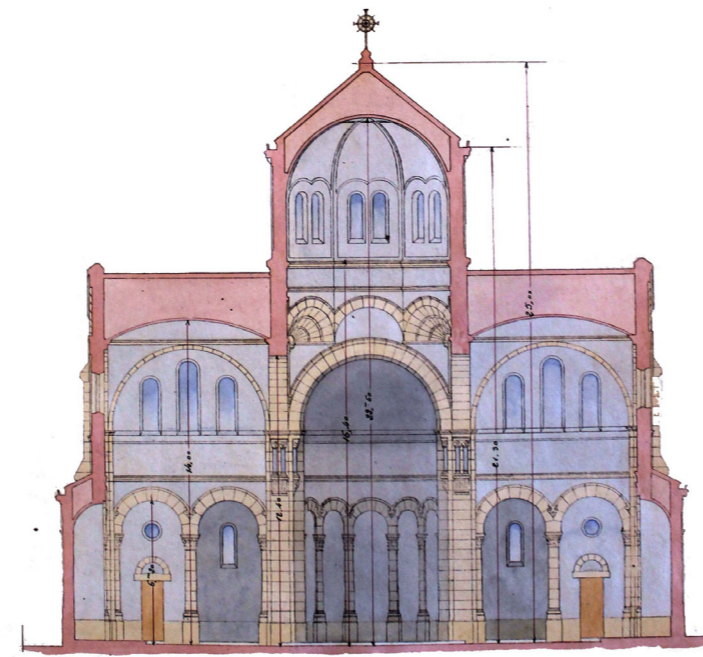
1683

SÉPARATION DE L'ÉGLISE ET
DE L'ÉTAT

1905



COUPE LONGITUDINALE



COUPE TRANSVERSALE SUR LE TRANSEPT



FAÇADE LATÉRALE



— FAÇADE PRINCIPALE —

Le projet de reconstruction est inspiré du style roman. Ce projet se rattache à des éléments de composition traditionnelle:
 croix latine
 frontons triangulaires
 parvis d'entrée

lecture extérieure de la composition interne de l'église:
 clocher octogonal
 chapelles latérales dans les transept

quelques évolutions:
 création de nefs latérales pour la circulation

Matériaux:
 appareillage en pierre

Contexte de transition:

1. Perte d'influence de l'église sur les populations suite à la séparation de l'église et de l'Etat en 1905: église en rupture avec le quotidien
 Désaffection populaire du catholicisme.

2. Après la guerre le christianisme cherche à reprendre une position perdue et à rajeunir son message:
 De 1920 à 1960: L'église veut retrouver son influence sur la société française et s'ouvre alors une grande période de construction et de remplacement des bâtiments saisis et confisqués lors de la séparation de l'église et de l'Etat. Environ 4500 églises sont construites entre 1918 et 1940

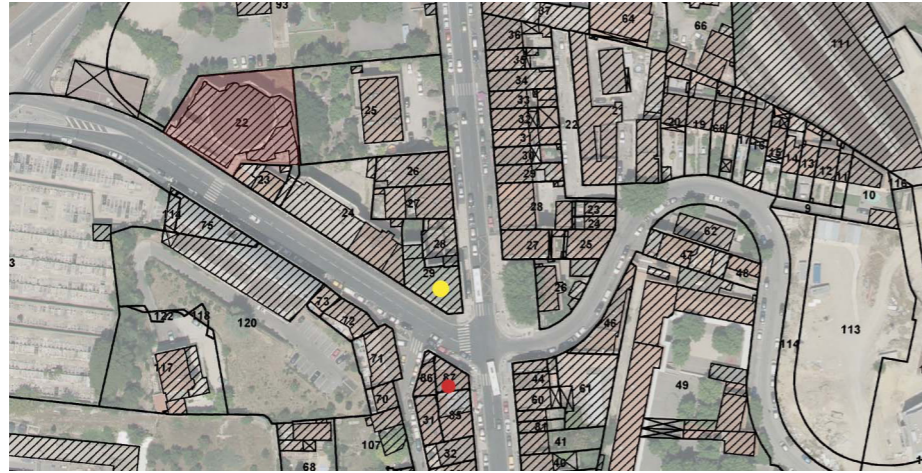
La banlieue devient un territoire de croisade pour l'église, où vivent des populations ouvrières de plus en plus nombreuses. Une population qui a échappé aussi bien aux institutions qu'à l'église.

Ce contexte se lie aussi dans le quartier St Louis :
 Expansion économique et démographique liée aux activités portuaires et industrielles. Sa population est passée de 3000 à 17000 habitants de 1926 à 1931.

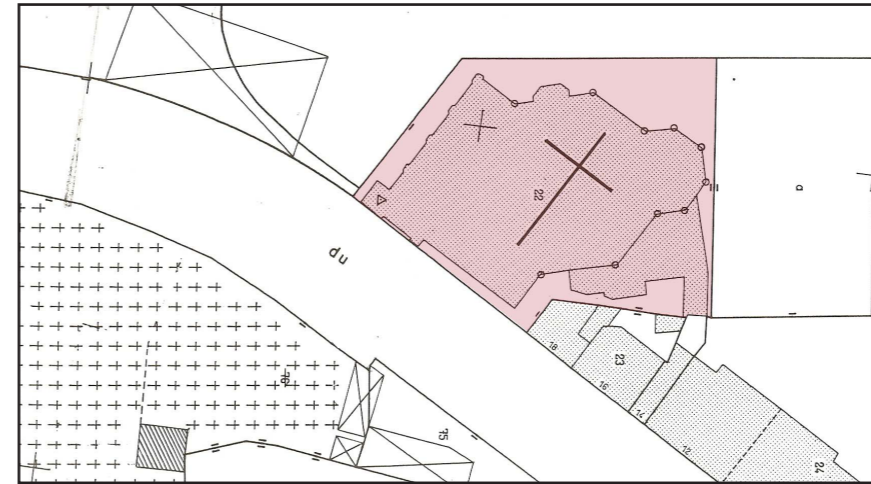
DÉBUT D'UNE PÉRIODE DE CROISADE POUR LE CHRISTIANISME :
 NOUVELLES CONSTRUCTIONS DANS TOUTE LA FRANCE

1611

1920



Nouveau site: issue d'un don d'une paroissienne



Implantation de la nouvelle église: Parcelle irrégulière ne permettant pas une implantation traditionnelle perpendiculaire à la rue: pose des problèmes pour l'orientation de l'église

PARADOXE DE LA NOUVELLE PAROISSE ST LOUIS :

UN ÉDIFICE HYBRIDE: ENTRE TRADITIONALISME ET MODERNISME



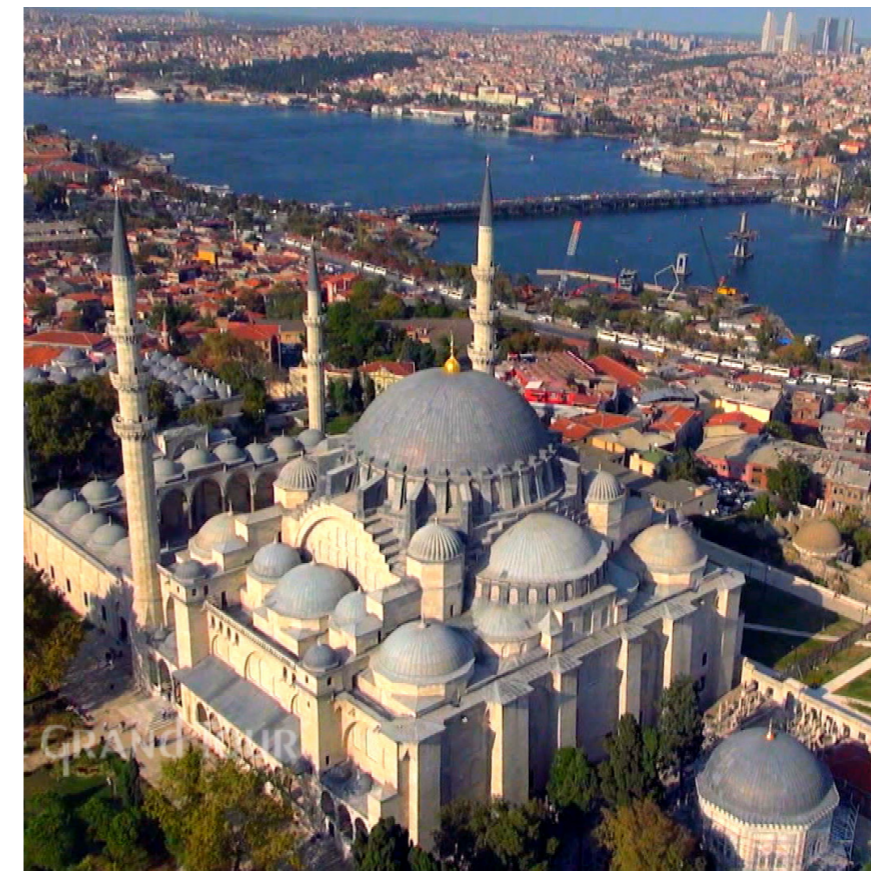
L'Eglise veut rompre avec la nostalgie et démontrer son implantation dans l'actualité à travers l'innovation:

- Utilisation de matériaux nouveaux comme le béton armé ou matériaux redécouverts: brique (Pour des raisons économiques)
- Jean Sourdeau: architecte en chef du ministère de la reconstruction arrivé à marseille en 1928

Perception plus moderne de l'architecture: « simplicité, pureté et sincérité» Renoncer au «pastiche» tout en s'inspirant des solutions techniques anciennes associés à des matériaux nouveaux.

Il associe le progrès à l'économie de matière

MULTIPLICITÉ DES RÉFÉRENCES



1. Byzantine
Une composition d'ensemble faisant référence à l'église Sainte-Sophie surtout dans l'usage de la coupole surbaissée
2. Le roman
sobriété des surfaces
3. Gothique
verticalité des supports
4. Influence islamique
association du volume « boîte» de la nef à la coupole + Clocher éfilé à l'apparence de minaret.

But de Sourdeau: réveiller la perception du sacré dans l'édifice à travers l'adoption de ces symboles religieux.

CONSTRUCTION DE LA NOUVELLE PAROISSE ST LOUIS

1935

SYMBOLIQUE

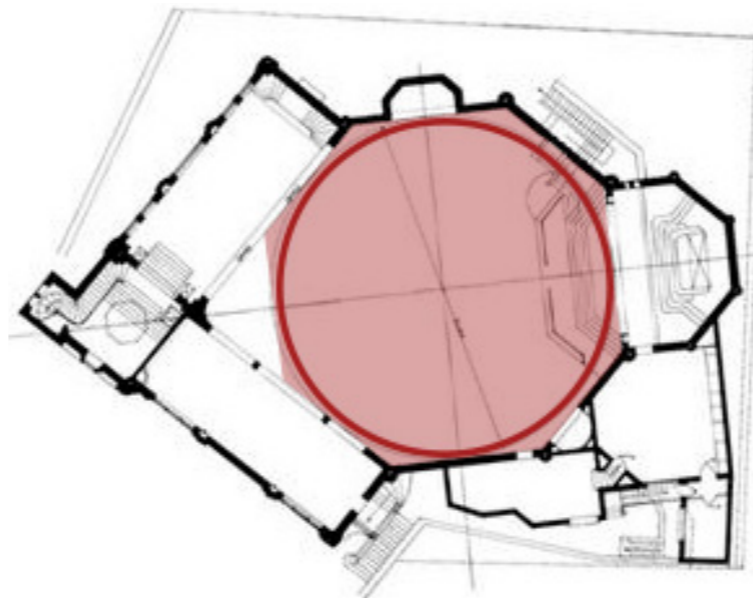
Retour aux symboles architecturaux utilisés aux premiers temps du christianisme avec l'utilisation de formes simples et de leurs symboliques pour redonner une signification profonde à l'architecture religieuse.



Le dôme: symbole d'abris/ refuge



le clocher: métaphore du navire évoquant le souvenir de l'arche de noé avec l'ange à la couronne en figure de proue....



L'octogone de la nef: élément de transition entre le sol et le cercle de la coupole. Le cercle représente la spiritualité et l'octogone le passage intermédiaire dans la recherche de spiritualité. Un intermédiaire entre dieu et les hommes.

ÉVOLUTION DE LA PAROISSE

MARGINALISATION DE L'ÉDIFICE, ET RUPTURE AVEC LA POPULATION

- Activité économique portuaire et industrielle en diminution.
- la population augmente à Saint Louis mais la fréquentation des fidèles diminue
- manque de connaissance de la paroisse des habitants du quartier
- image négative du quartier Saint Louis liée à son implantation dans une zone défavorisée.

Mais paradoxalement, l'église fut inscrite à l'inventaire des monuments historiques de la ville de Marseille en 1987, après la redécouverte de la valeur historique des bâtiments de l'entre-deux-guerres.

L'oubli de ces édifices a eu pour corollaire plusieurs dommages notamment la structure en béton armé:

- le gel a fait éclater certaines parties des poteaux sur les parties extérieures de la façade.
- Apparition des fissures sur la coupole.



REGAIN D'INTÉRÊT POUR LES BÂTIMENTS DE L'ENTRE DEUX GUERRES

INSCRIPTION DE LA PAROISSE ST LOUIS AUX MONUMENTS HISTORIQUES DE LA VILLE DE MARSEILLE

DÉGRADATION DE LA PAROISSE

1950

1960

1987

2016

2 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

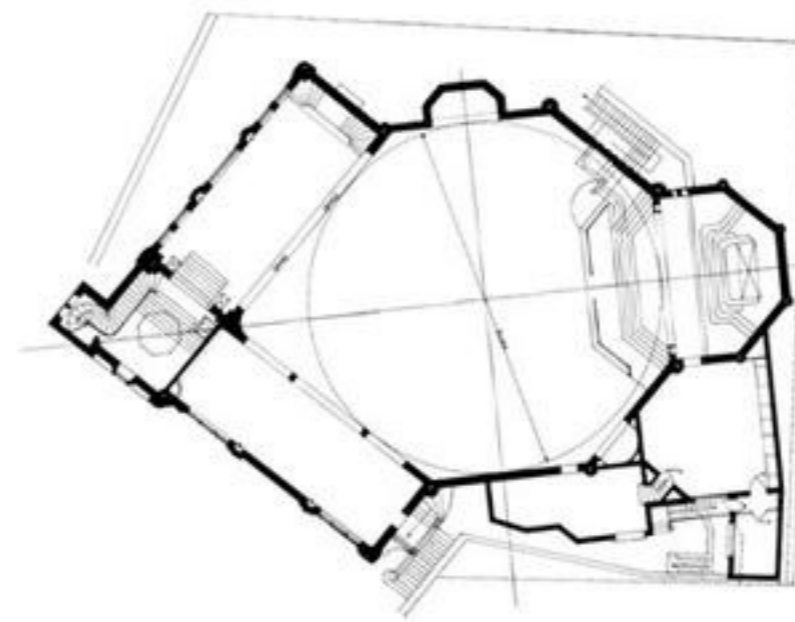
ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - DÉFINITION GÉOMÉTRIQUE DE LA FORME



Enclavement de l'église au sein du bâti environnant
capacité 900 places

nef centrale: hauteur 20m et un autel surelevé de 2m
matériaux: structure béton armé en ossature et remplissage en pierre
hauteur totale: 40m
coupole de 21m de diamètre

OPTIMISATION DE L'ESPACE



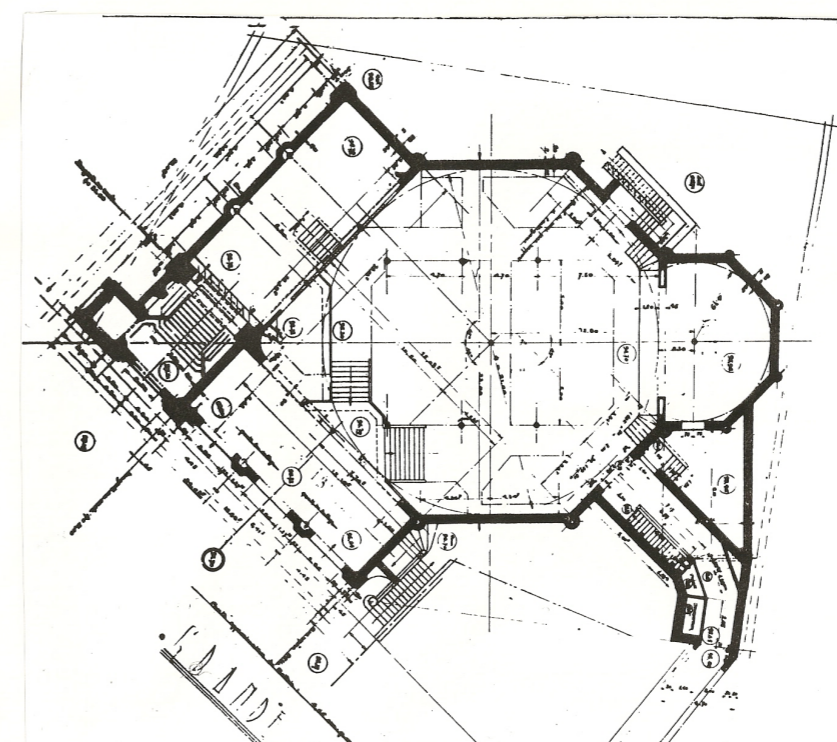
Plan RDC

parvis couvert sous clocher
forme octogonale le long d'un axe oblique par rapport à la rue pour maximiser la longueur de l'église.

plan centré et angles utilisés pour les dépendances

Espace d'entrée perpendiculaire à la rue: escalier+ parvis

chapelle avec cloisons mobiles: église agrandie les jours de grande affluence augmenté par les tribunes à l'étage supérieure d'une capacité de 250 places



Plan R-1

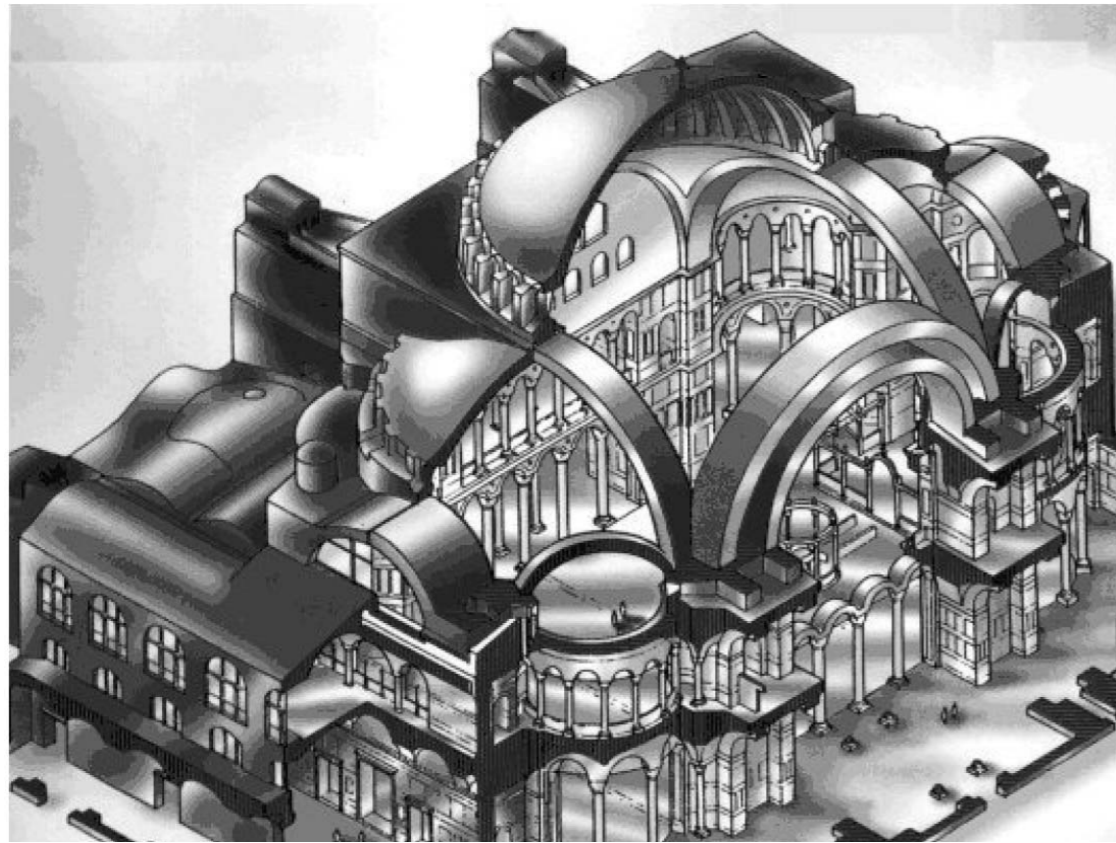
une crypte semi-enterrée (plafond 5m 10 piliers)

La crypte accueille les locaux paroissiaux. Elle peut se diviser pour toutes sortes d'usages avec une salle de 5m de haut prévu comme salle de théâtre et comporterait 600 à 700 places assises

3 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DE LA FORME - ÉTUDE DE LEUR MISE EN OEUVRE

ANALOGIE DU SYSTÈME CONSTRUCTIF



EGLISE SAINTE SOPHIE 532

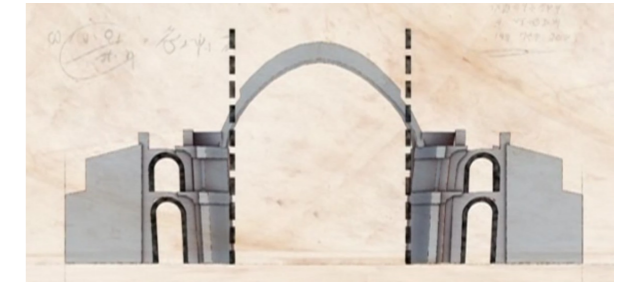
Elle s'inspire directement de la composition structurelle de l'église Sainte-Sophie. (conception novatrice pour l'époque) Bien que les dimensions sont ici majeures (31m de diamètre) le principe est le même: une coupole abaissée sur un tambour ajouré répartissant son poids sur les quatre arches périmétrales grâce à un système de pendentif dans les angles donnant en plan une forme octogonale. Ces pendentifs permettent de transmettre les poussées de la coupole des piliers jusqu'au sol.

Sa coupole est composée elle aussi de brique de terre allégée, permettant à l'édifice de supporter son propre poids. Les ceintres des arcs et de la coupole sont elles aussi réalisés en brique. Il y a donc à l'inverse de la paroisse St Louis l'utilisation d'un seul type de matériaux.

Les solutions entreprises pour compenser les poussées horizontales de la coupole sont des extensions en forme de demi-coupole sous les arcs. Elles ont été placées sur les côtés de la coupole principale. Cette solution a été aussi mise en œuvre à Saint Louis dans la partie supérieure du chœur. L'édifice après sa réalisation reste stable mais fragile. Il ne permet aucune marge de sécurité.

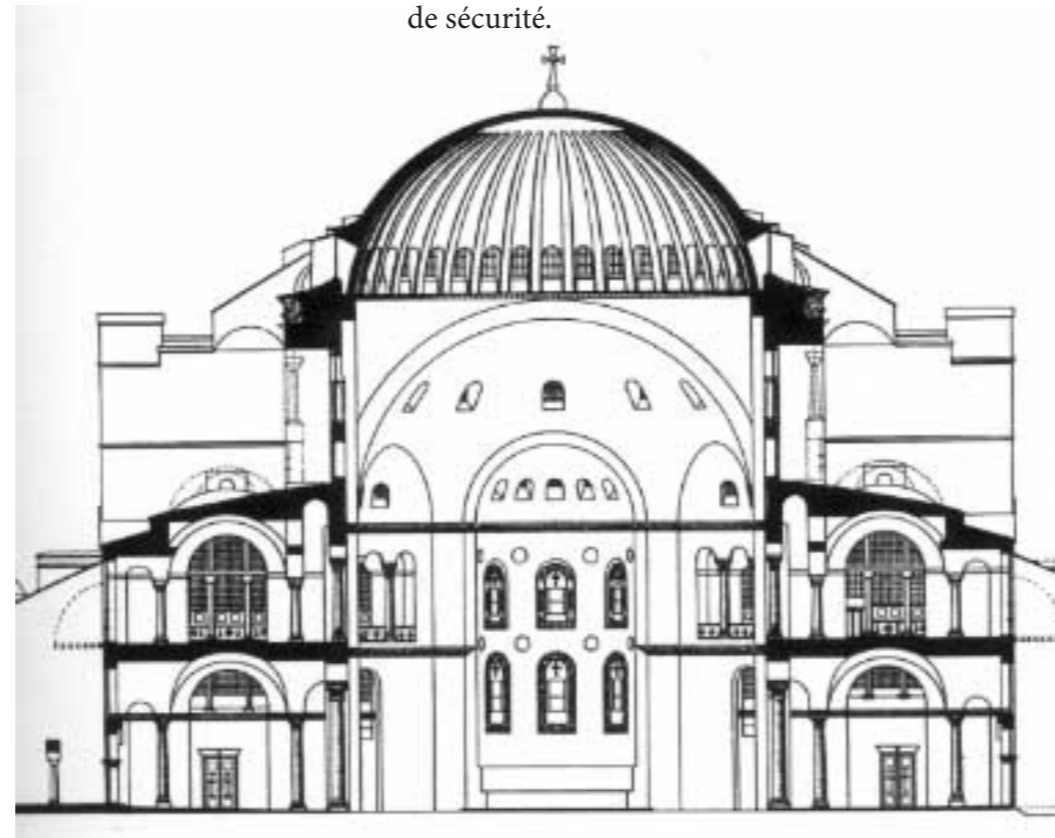
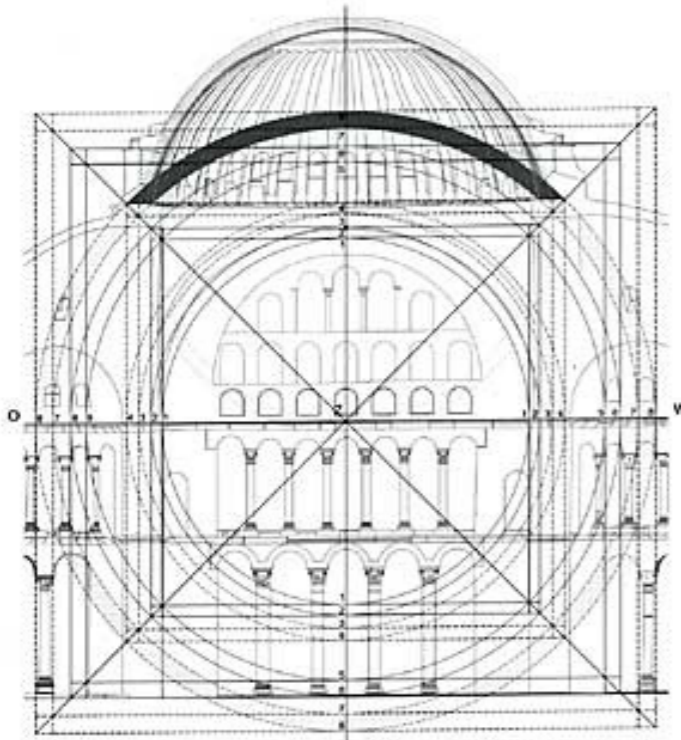


COMPOSITION STRUCTURELLE



FRAGILITÉ DE L'ÉDIFICE

SOLUTIONS ADOPTÉES FACE À LA FRAGILITÉ DE L'ÉDIFICE:



En 557 un tremblement de terre détruit la coupole de Sainte Sophie. Après une étude sur les fissurations qui ont engendré la rupture de la coupole, le tambour percé cylindrique était l'élément le plus fragile. C'est cet élément qui aurait fragilisé la coupole après les secousses. Lors de sa reconstruction, cet élément fut éliminé et la courbure du dôme fut ajustée pour que les poussées puissent être reprises par les pendentifs.

3 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DE LA FORME - ÉTUDE DE LEUR MISE EN OEUVRE

STRUCTURE PRINCIPALE EN BÉTON ARMÉ

Prix moindre qu'une construction classique

Grandes élévations sans contrebutement

de **vaste surfaces unifiées**

Grande portée

association avec différents matériaux

maniabilité+ économie

Poles reliées par linteaux et arcs

REPLISSAGE VERTICAUX

Pierre

COMPOSITION COUPOLE

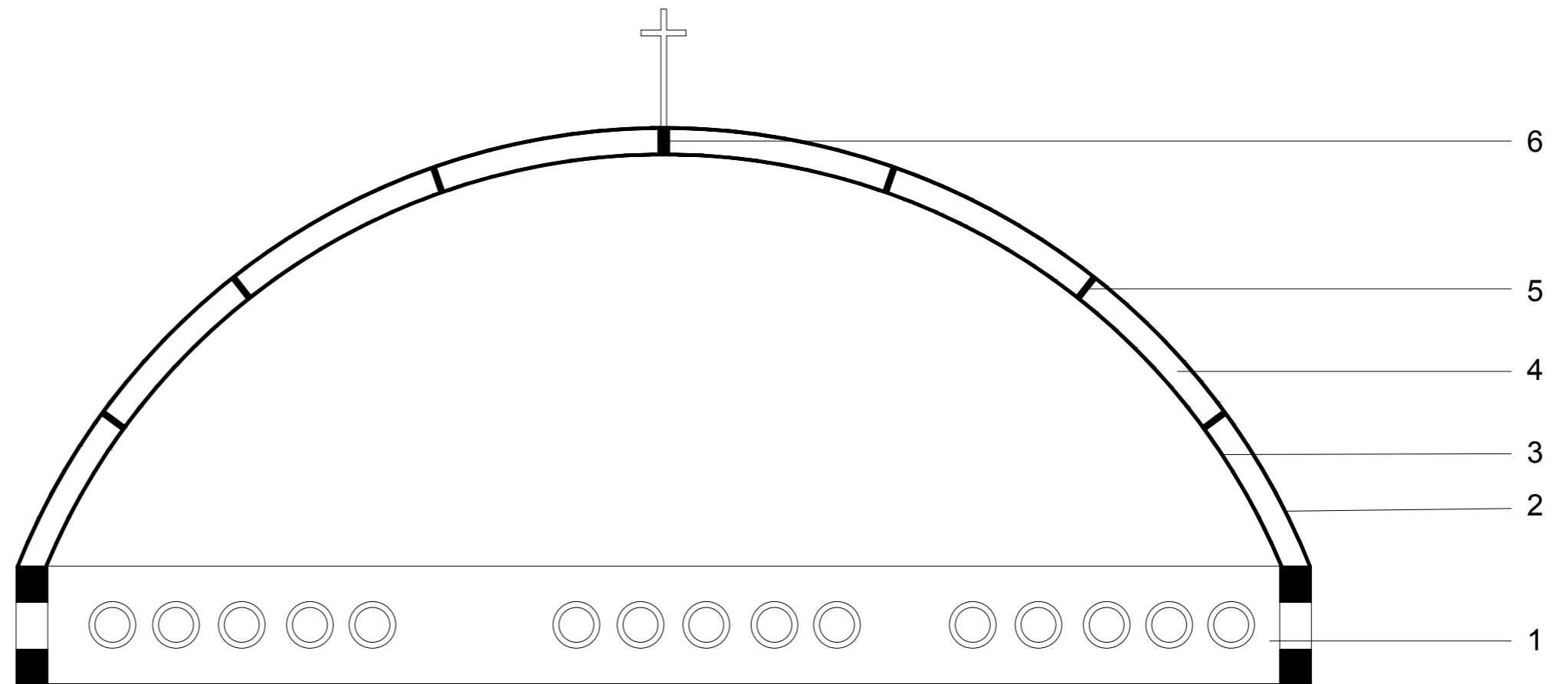
coupole sur tambour et pendentifs:

transition de la masse du **tambour circulaire** du dôme: **8 pendentifs triangulaires**.

Deux de ces pendentifs (face au chœur) ont leurs poussées reportées sur les **arcs d'ouverture des tribunes**.

Ces mêmes arcs concentrent les **poussées qu'ils reçoivent sur les 2 piliers de fondation de la tour-porche**

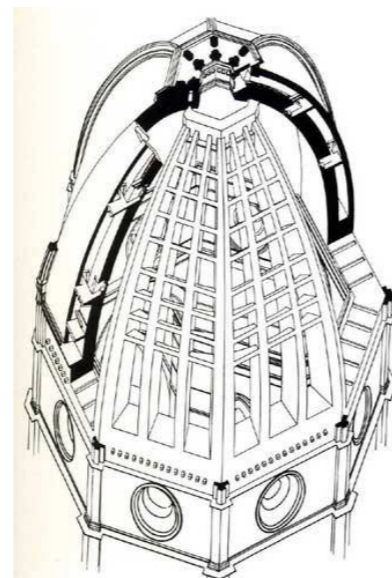
Hypothèses constructives, effectuées à partir du dome de Sainte Sophie et Santa Maria del Fiore



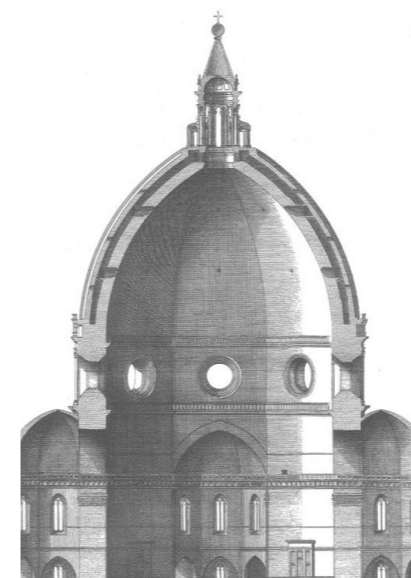
Coupe sur le dome et le Tambour de l'église Saint Louis



Béton: arcs de soutien
Brique: Deux voiles plus légère



EGLISE SANTA MARIA DEL FIORE



1 : Tambour circulaire en béton armé avec des ouvertures rondes (ép. = 0.50 m / diamètre tambour = 21 m)

2: Coupole externe en brique (ép. = 0.05 m)

3: Coupole interne en brique (ép. = 0.05 m)

4: Vide entre les coupoles (ép. = 0.40 m)

5: Cadre constitué de nervures voûtées en béton armé (ép= 0.50 m)

6: 8 arcs principaux (ép. = 0.50m / portée = 28m)

4 L'EGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU DÔME

léger décalage du cercle représentant la coupole par rapport au centre de l'octogone de la nef. On remarque que la ligne du cercle ne touche pas les faces de chaque côté de l'abside du sanctuaire. Il est composé par l'adjonction de deux **grandes trompes en escalier**, placées en-dessous des pendentifs de la coupole, La coupole est quelque peu surbaissée, percée d'ouvertures ronde.



Hypothèses sur la géométrie du dôme

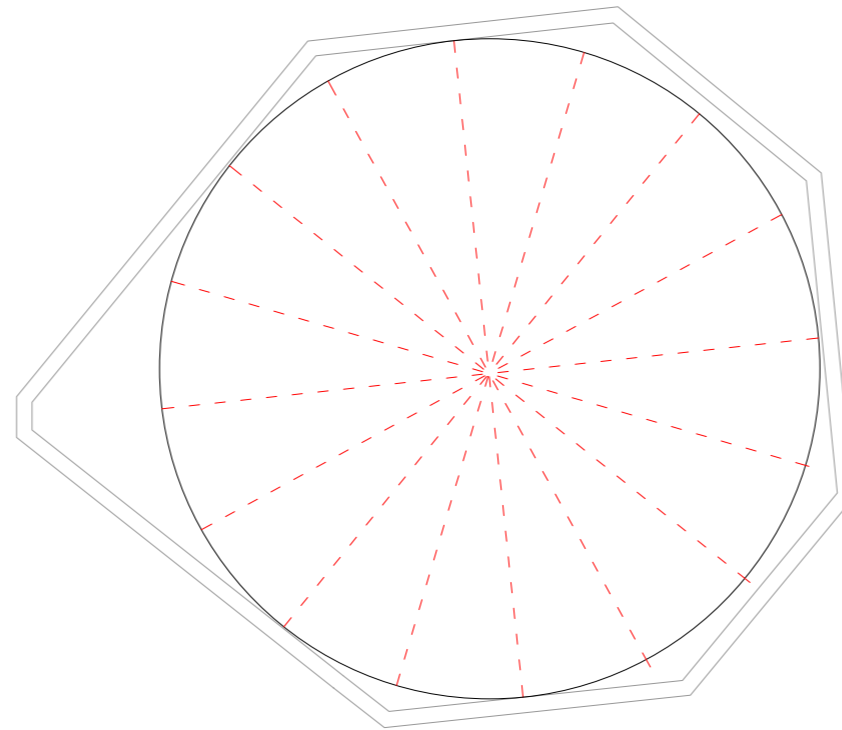


schéma des entraxes des 8 arcs principaux du dôme

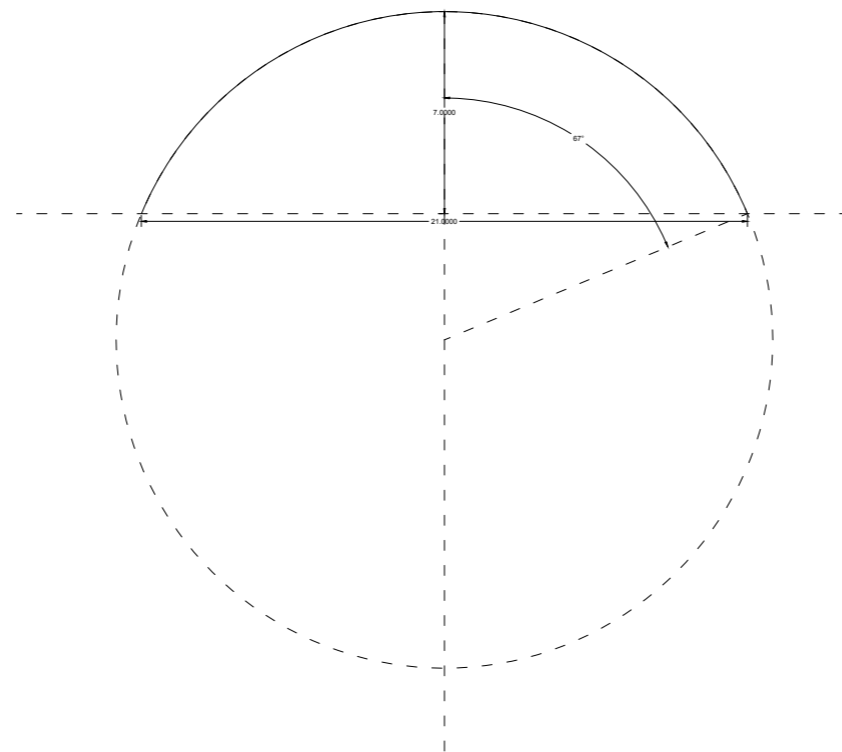


Schéma de la courbure du dôme

1) Données du dôme:

Hauteur dôme = 7 mètres
 Diamètre en base du dôme = 21 mètres
 Épaisseur = 0,50 mètres
 Portée = 28 mètres

2) Relation corde / rayon/ flèche:

$$R = \frac{c^2}{8f} + \frac{f}{2}$$

c= Diamètre en base
 f= Hauteur

3) Rayon du cercle dessinant la courbure du dôme

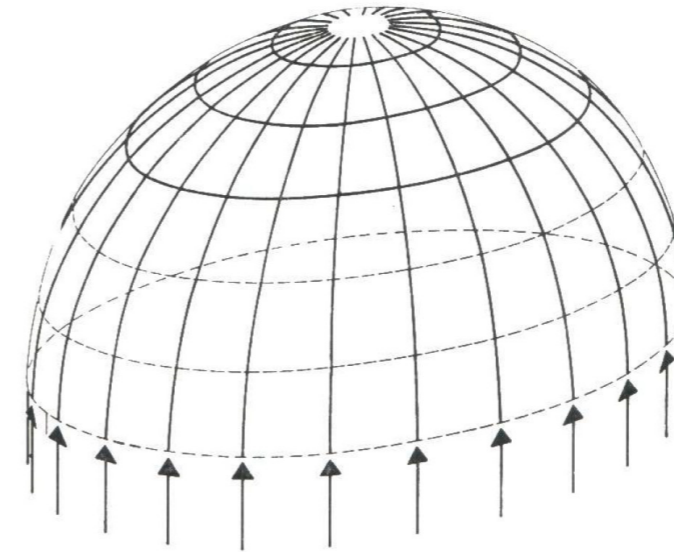
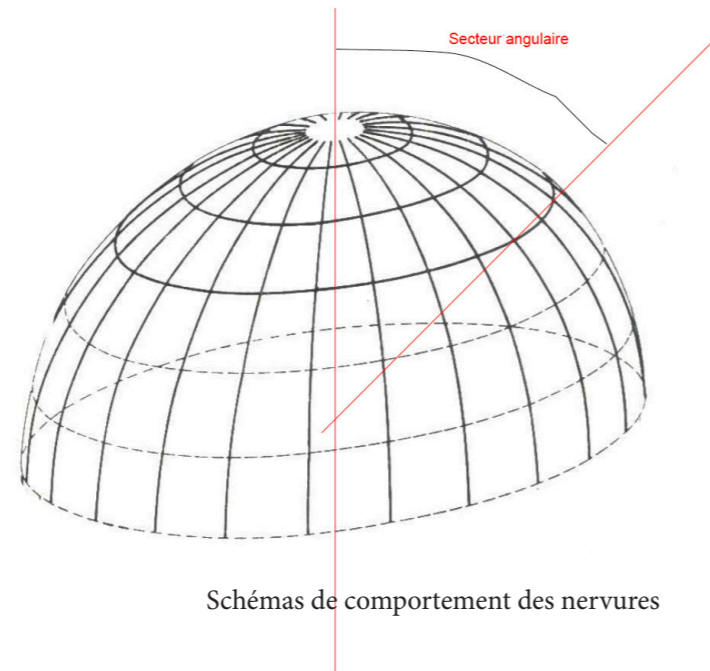
$$R = \frac{21^2}{(8 \times 7)} + \frac{7}{2}$$

$$R = 11,375 \text{ mètres}$$

4 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU DÔME

Comportement simplifié du dôme sous chargement gravitaire



Etude de Cas 1: Chargement gravitaire

1) Comportement:

- + Méridiens comprimés
- + Parallèles
 - comprimées au dessus du secteur angulaire (partie haute)
 - tendues au dessous du secteur angulaire (partie basse)

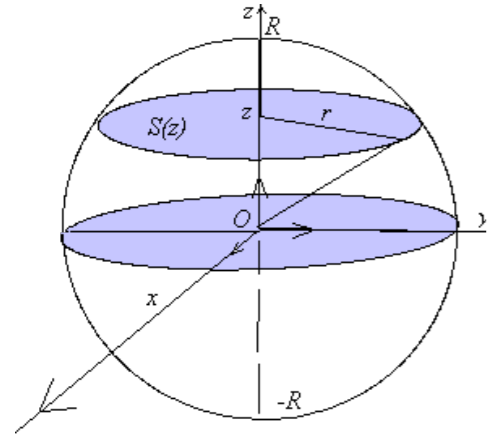
4 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU DÔME

Etude de cas du comportement du dôme sous chargement gravitaire

2) Niveau de contrainte

+Volume d'une sphère:



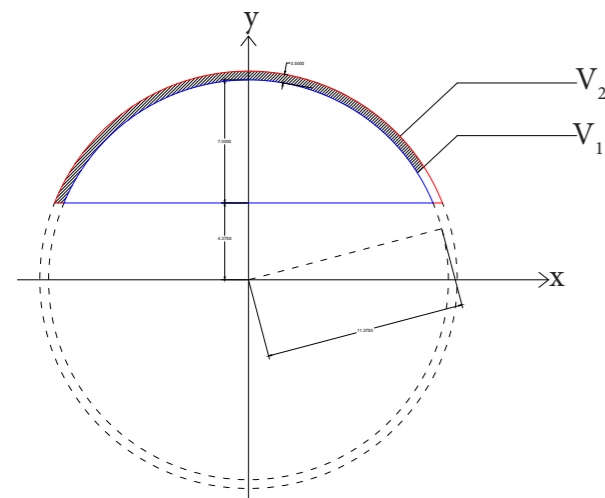
$$V_{sphere} = \int_{-R}^R S(z) dz$$

$$= \int_{-R}^R \Pi \times r^2 dz \quad \text{or } R^2 = r^2 + z^2 \Rightarrow r^2 = R^2 - z^2$$

$$= \Pi \int_{-R}^R (R^2 - z^2) dz$$

$$= \Pi \left[R^2 \times z - \frac{z^3}{3} \right]_{-R}^R$$

+Calcul du volume du dôme:



Bornes d'intégration de la Sphère 1:

$$I_1 [-R=4,375 ; R=11,375]$$

$$V_1 = \Pi \left[R^2 \times z - \frac{z^3}{3} \right]_{-R}^R$$

$$= \Pi \left[11,375^2 \times z - \frac{z^3}{3} \right]_{-4,375}^{11,375}$$

$$= 1391,86 \text{ m}^3$$

Bornes d'intégration de la Sphère 2:

$$I_2 [-R=4,375 ; R=11,875]$$

$$V_2 = \Pi \left[R^2 \times z - \frac{z^3}{3} \right]_{-R}^R$$

$$= \Pi \left[11,875^2 \times z - \frac{z^3}{3} \right]_{-4,375}^{11,875}$$

$$= 1656,7 \text{ m}^3$$

Soit le volume du dôme :

$$V_{dome} = V_2 - V_1$$

$$= 1656,7 - 1391,86$$

$$= 264,84 \text{ m}^3$$

+Surface d'appui calculée en base du dôme :

soient :

$$\varnothing_{interieur} = 21\text{m}$$

$$\varnothing_{exterieur} = 22\text{m}$$

On donc :

$$S_{appui} = \pi R_{ext}^2 - \pi R_{int}^2$$

$$S_{appui} = \pi 11^2 - \pi 10,5^2$$

$$S_{appui} = 33,77 \text{ m}^2$$

+Masse volumique du béton armée:

$$\rho_{b.a} = 2500 \text{ kg.m}^{-3}$$

+Estimation du poids du dôme:

$$W = \rho_{b.a} \times V_{dome} \times g$$

$$W = 2500 \times 264,84 \times 9,81$$

$$W = 6\,495\,201 \text{ N}$$

+Contrainte de compression du dôme

$$\sigma_{dome} = \frac{W}{S_{appui}}$$

$$\sigma_{dome} = \frac{6495201}{33,77}$$

$$\sigma_{dome} = 192\,337 \text{ N.m}^{-2}$$

$$\text{Soit } \approx 0,19 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{dome} < \sigma_{adm \text{ b.a}} = 25 \text{ MPa}$$

4 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU DÔME

Etude du comportement du dôme

Schémas de la charge équivalente cas général

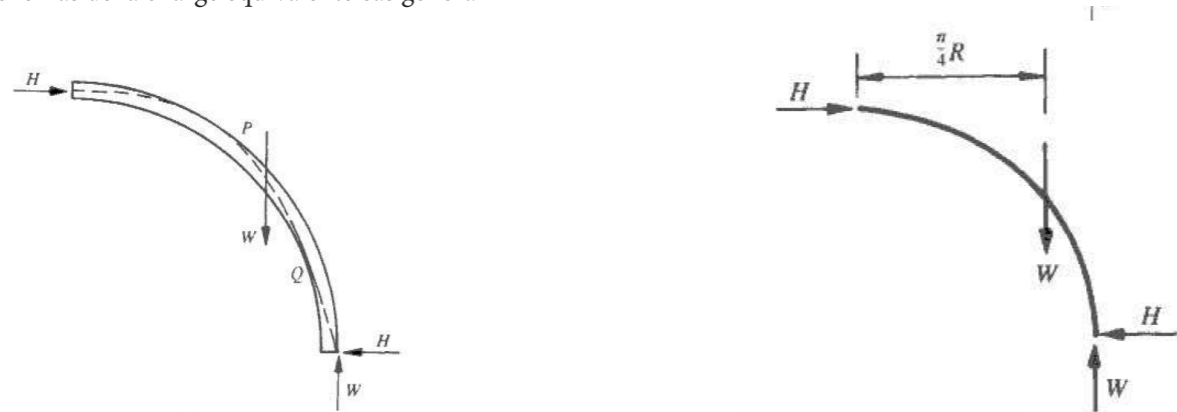
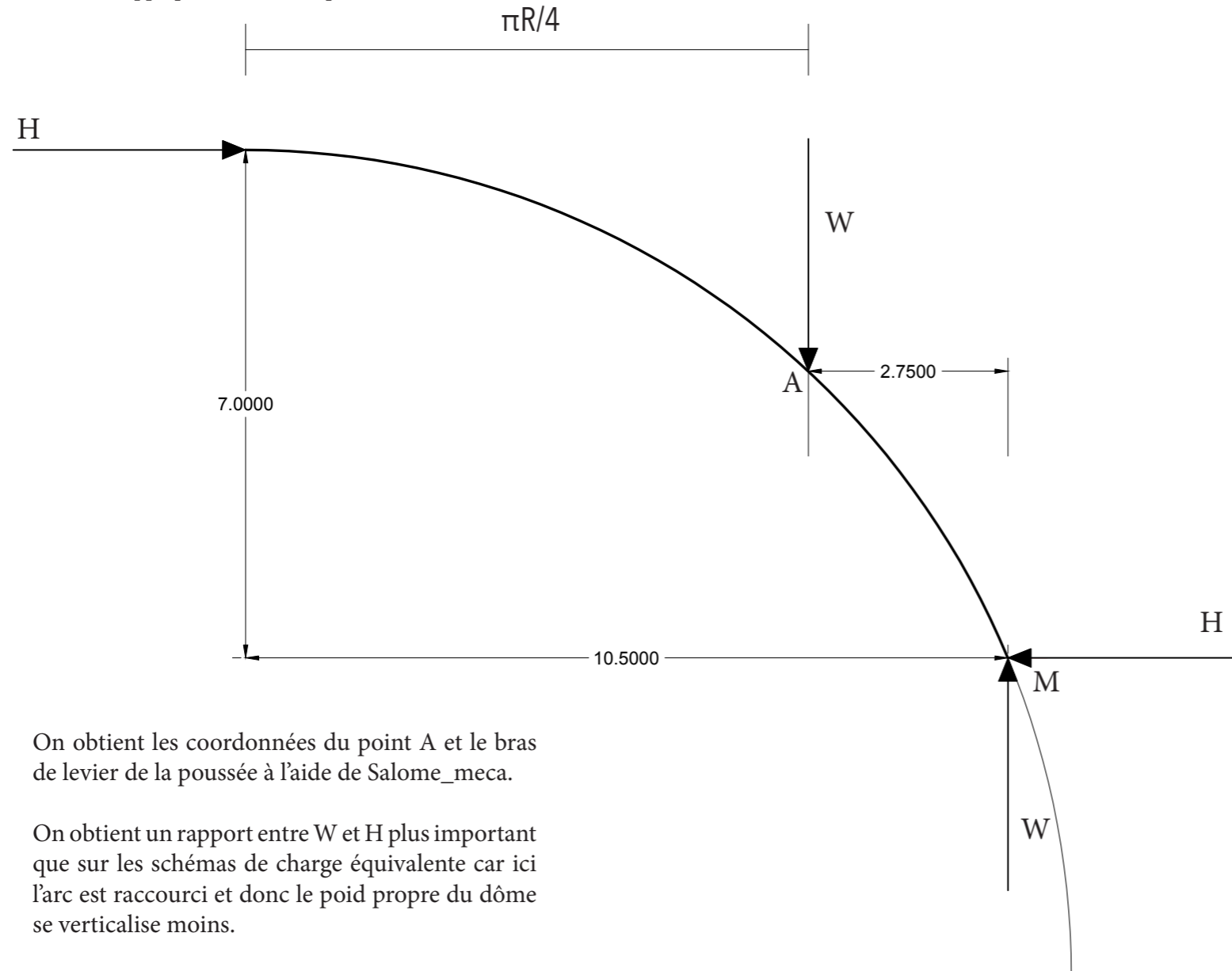


Schéma appliqué à l'étude statique du dôme



On obtient les coordonnées du point A et le bras de levier de la poussée à l'aide de Salome_meca.

On obtient un rapport entre W et H plus important que sur les schémas de charge équivalente car ici l'arc est raccourci et donc le poids propre du dôme se verticalise moins.

3) Estimation de la poussée H par l'équilibre des moments au point M:

$$\sum M_M : -H \times 7 + W \times 2,75 = 0$$

$$H = \frac{W \times 2,75}{7}$$

$$H = \frac{6495201 \times 2,75}{7}$$

$$H = 2551,690 \text{ kN}$$

On a donc :

$$H = \frac{2551,690}{2 \times \pi \times 10,5}$$

$$H = 38677,5 \text{ N.m}^{-1}$$

Soit environ 4t.m⁻¹ de poussée en pied d'arc béton

On obtient ainsi une tension dans les tirants T :

$$T = H \times R$$

$$T = 38677,5 \times 10,5$$

$$T = 406114 \text{ N}$$

Soit environ une tension de 42t dans les anneaux.

4) Estimation de la section des aciers:

$$\sigma_{adm} = 235 \text{ MPa}$$

Hyp: Ici on prend la résistance admissible en traction d'un acier actuel, il est donc à noter que la résistance en traction des aciers utilisés lors de la construction n'étaient peut être pas d'aussi bonne qualité.

$$\sigma_{adm} = 235 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{T}{S_{acier}}$$

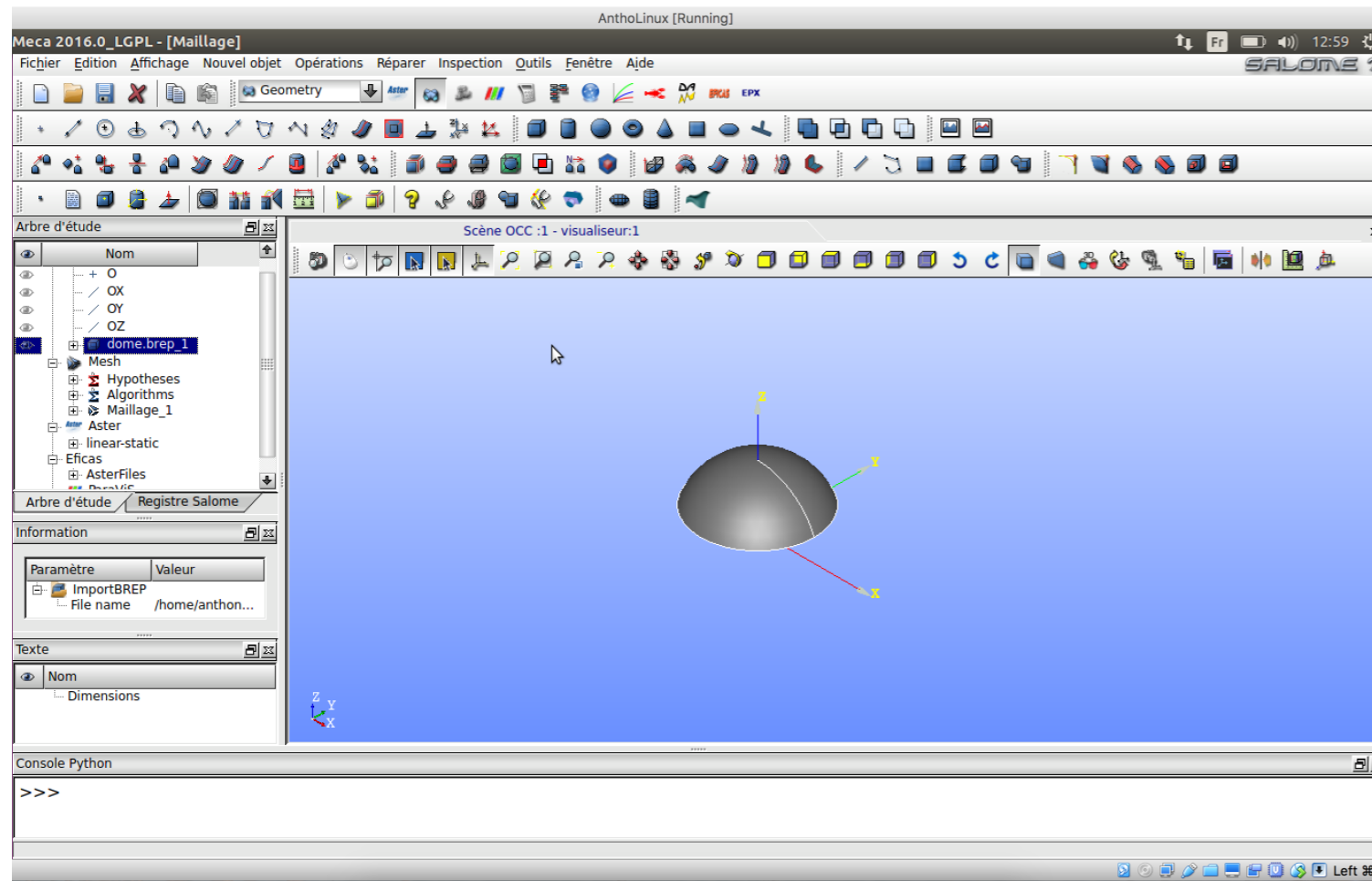
$$S_{acier} = \frac{T}{\sigma_{adm}}$$

$$S_{acier} = \frac{406114}{235 \times 10^6}$$

Soit une section d'action de 17cm² ou un rayon de 2,3cm

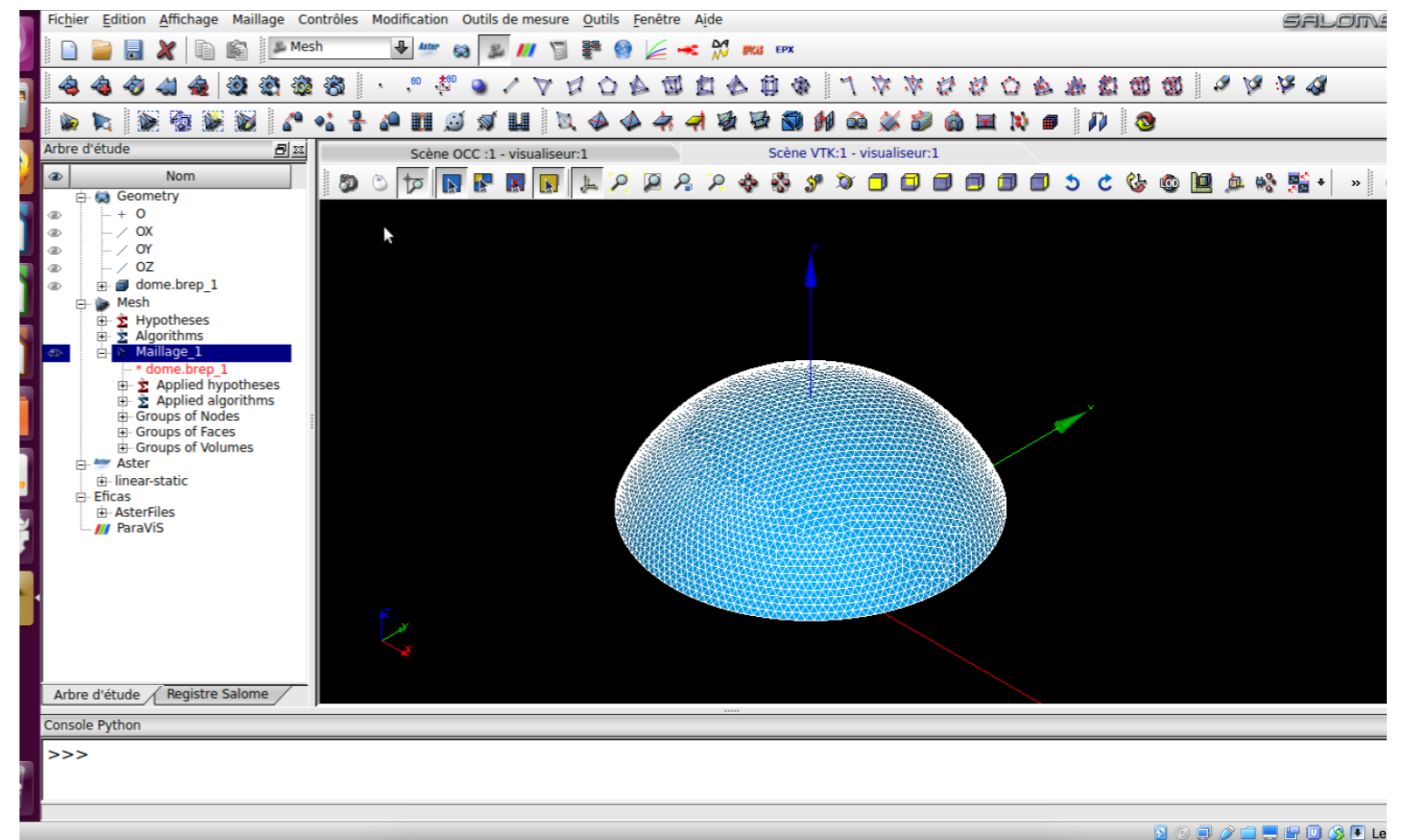
4 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU DÔME



Modélisation simplifiée avec «SALOME-MECA» pour approfondir le comportement du dôme.

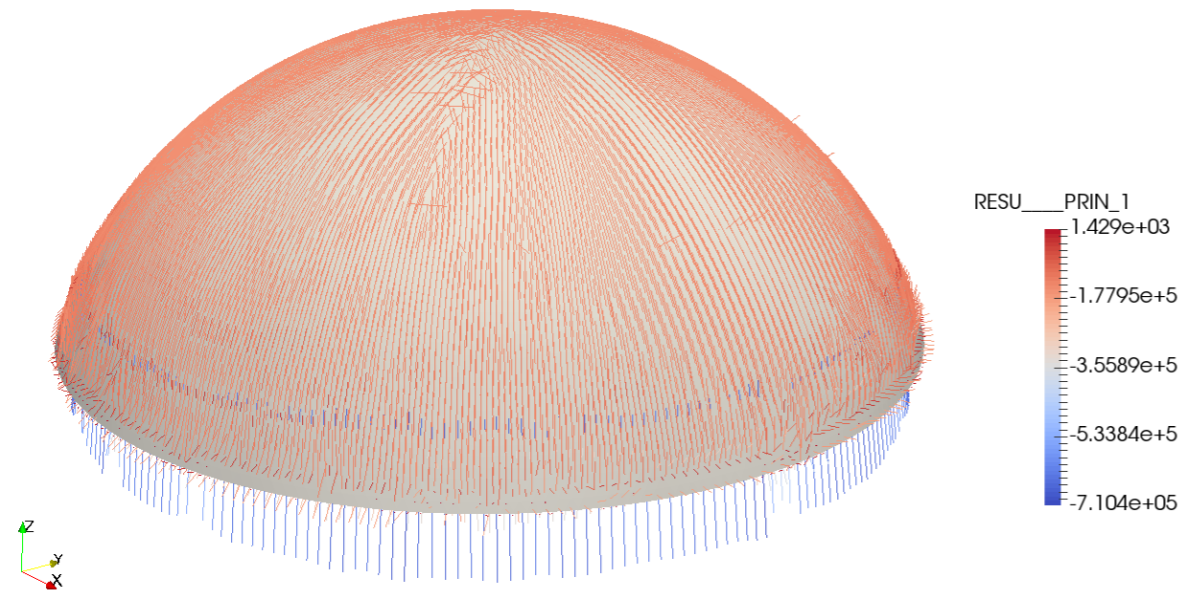
- > Modèle homogène et d'épaisseur constante, ce n'est pas le cas dans la réalité.
- > Uniquement sollicité sous sa charge gravitaire.
- > rôle du maillage (une maille dans l'épaisseur ne suffit pas pour obtenir des résultats cohérents)



4 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

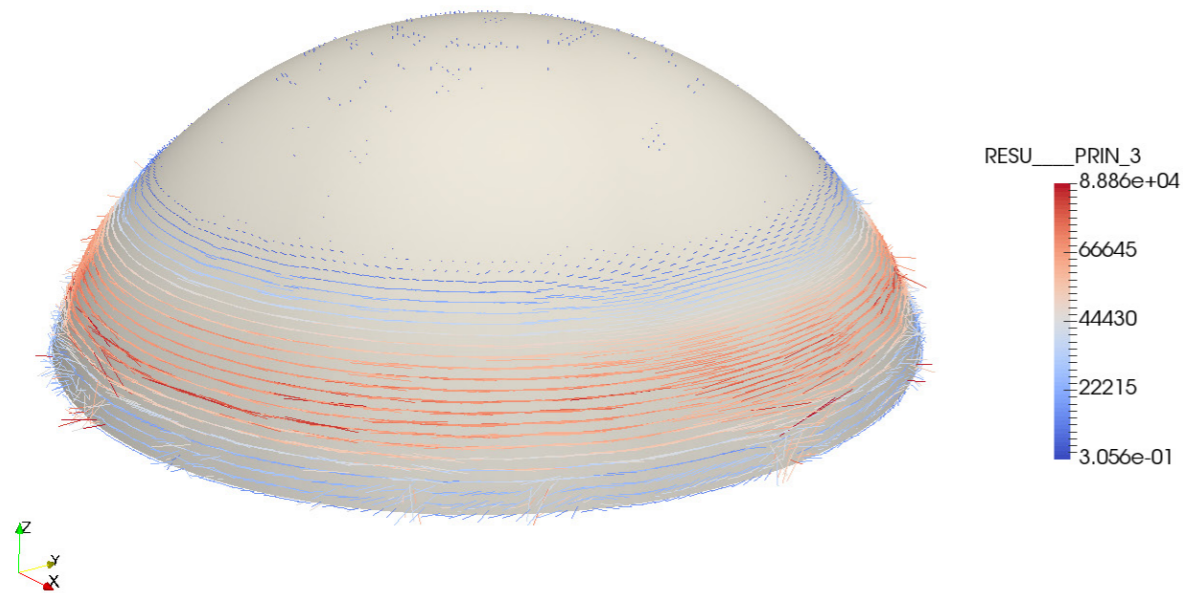
ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU DÔME

les contraintes principales 1 orientées selon les méridiens



Si on exclue les valeurs max aux conditions limites qui sont toujours sujettes à discussion (bloquages des noeuds d'une ligne en translation), on retrouve dans les 177950 N/m^2 (couleur saumon) et par le calcul à la main, on avait obtenu 192336 N/m^2

les contraintes principales 3 orientées selon les parallèles



On constat que les zones les plus tendues sont concentrées dans la partie basse du dôme.

Les fissures observées sur le dôme de Saint Louis sont situées dans la même zone.

5 L'ÉGLISE DE ST LOUIS

ANALYSE STRUCTURELLE DU DÔME - PHÉNOMÉNOLOGIE DE FISSURATION



IDENTIFICATION DES FISSURATIONS

Constat :

- > Présence des fissures verticales sur toute la périphérie basse du dôme.
- > Fissure dans la partie tendue.
- > Intersection des fissures avec les parallèles.
- > Présence d'humidité sur le tambour et les fissures.

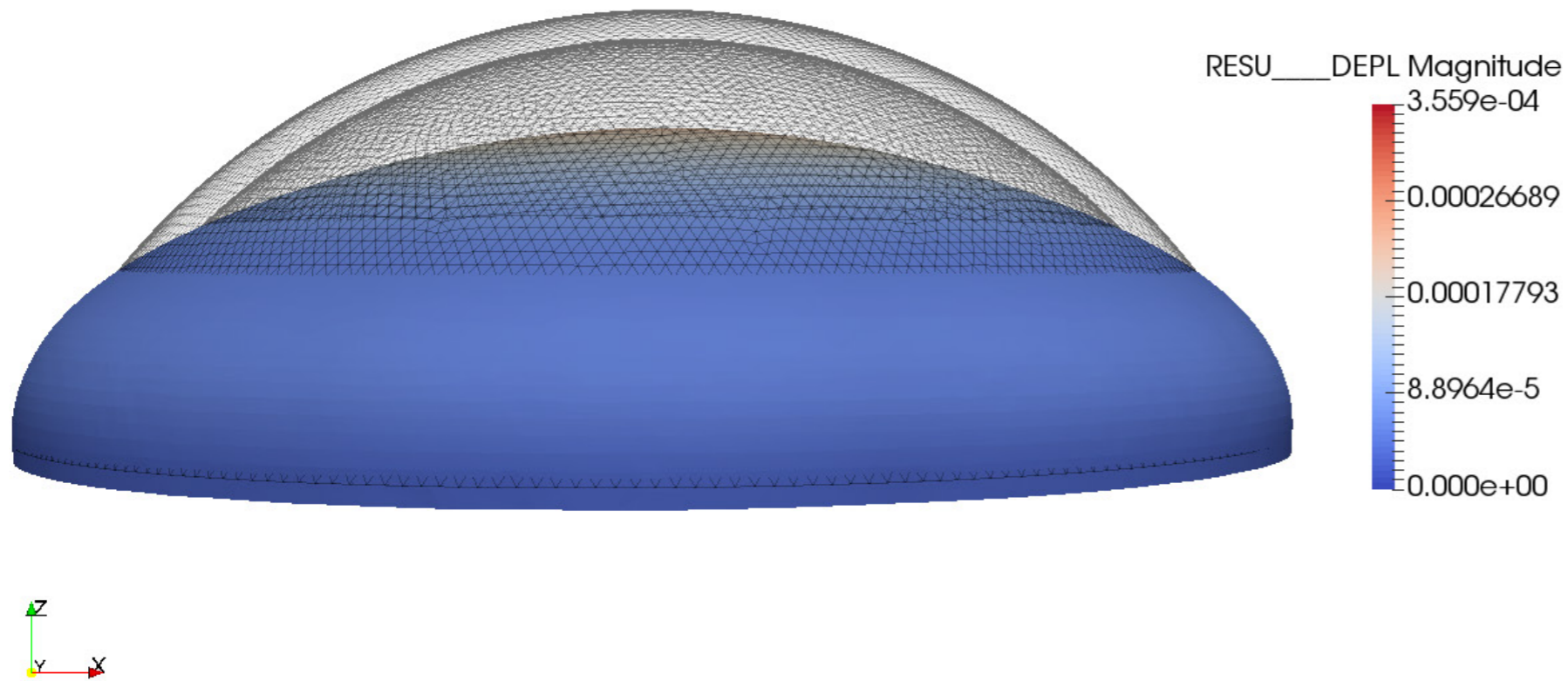
Hypothèse sur l'origine des fissures :

- > Béton armé dégradé par la corrosion des armatures.

Proposition des méthodes de réparation :

- > Mise en place de chaîne en périphérie d'un diamètre supérieure à 2mm
- > Colmatage des fissures.
- > Refaire l'étanchéité extérieure et intérieure pour diminuer les remontées capillaires et préserver les aciers.

Visualisation de la déformée du dôme sous son poids propre



Mise en relation avec un relevé laser et en ajustant la modélisation avec les conditions réelles, on pourrait superposer les déformées et ainsi avoir une idée plus précise des incidents structurels et des dispositifs à mettre en oeuvre pour conserver ce bâtiment.