

# Construire le courbe

École des Ponts ParisTech  
22 au 26 septembre 2014



Enseignants :

Cyril Douthe, Lionel Du Peloux, Romain Mesnil

# De quoi parle-t-on ?

---

Géométrie, Structure et Technologie...



# Programme de la semaine

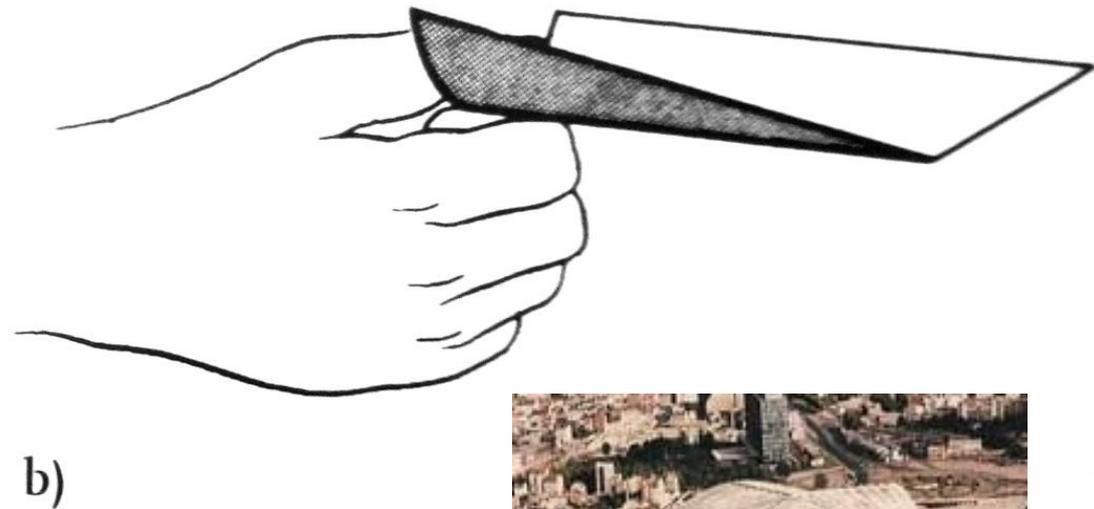
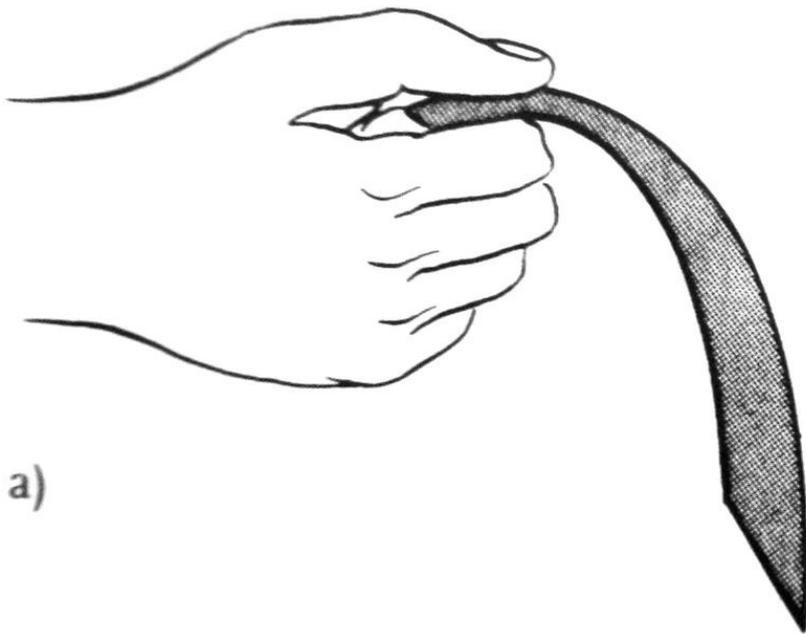
---

- 1 conférence introductive
- 3 conférences thématiques sur 3 typologies structurelles :  
structures textiles, gridshells élastiques & gridshells rigides
- Un atelier en petits groupes  
=> Jury/concours sur esquisse/maquette
- Réalisation de trois objets à grande échelle...



# Intérêt de la courbure

Transformer les charges perpendiculaires en charges axiales



La voûte du CNIT est ainsi formée de coques environ 20 fois plus minces que la coquille d'un œuf...

# A propos de modèles...

---

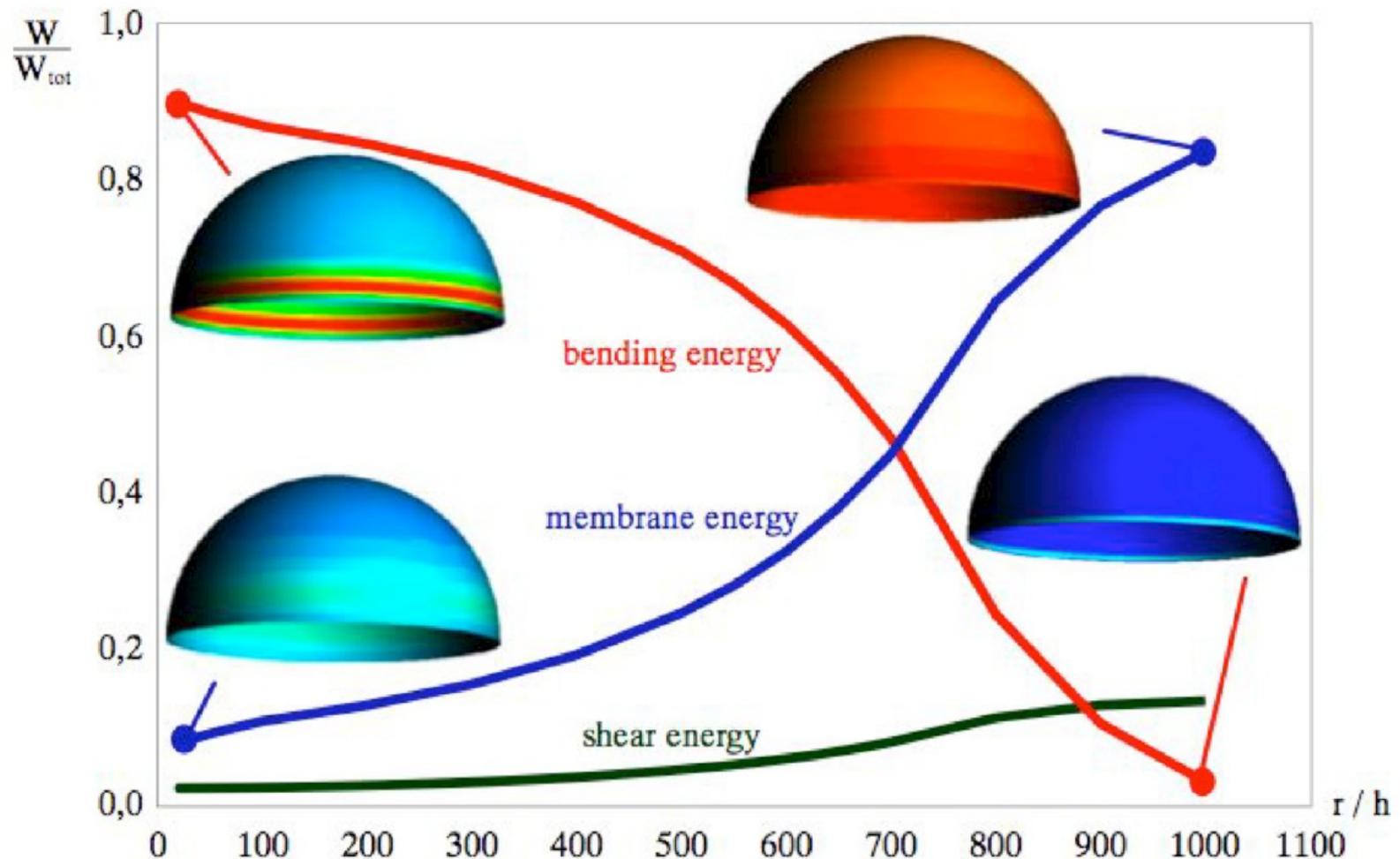
## Modèles 1D

- Poutres courbes
  - Couplage N-M
  - 3 Cls aux extrémités
  - (poutres courtes avec T)
- Fils et arches funiculaires
  - Effort normal seul,
  - 1CL à chaque extrémité,
  - la forme suit nécessairement le chargement.

## Modèles 2D

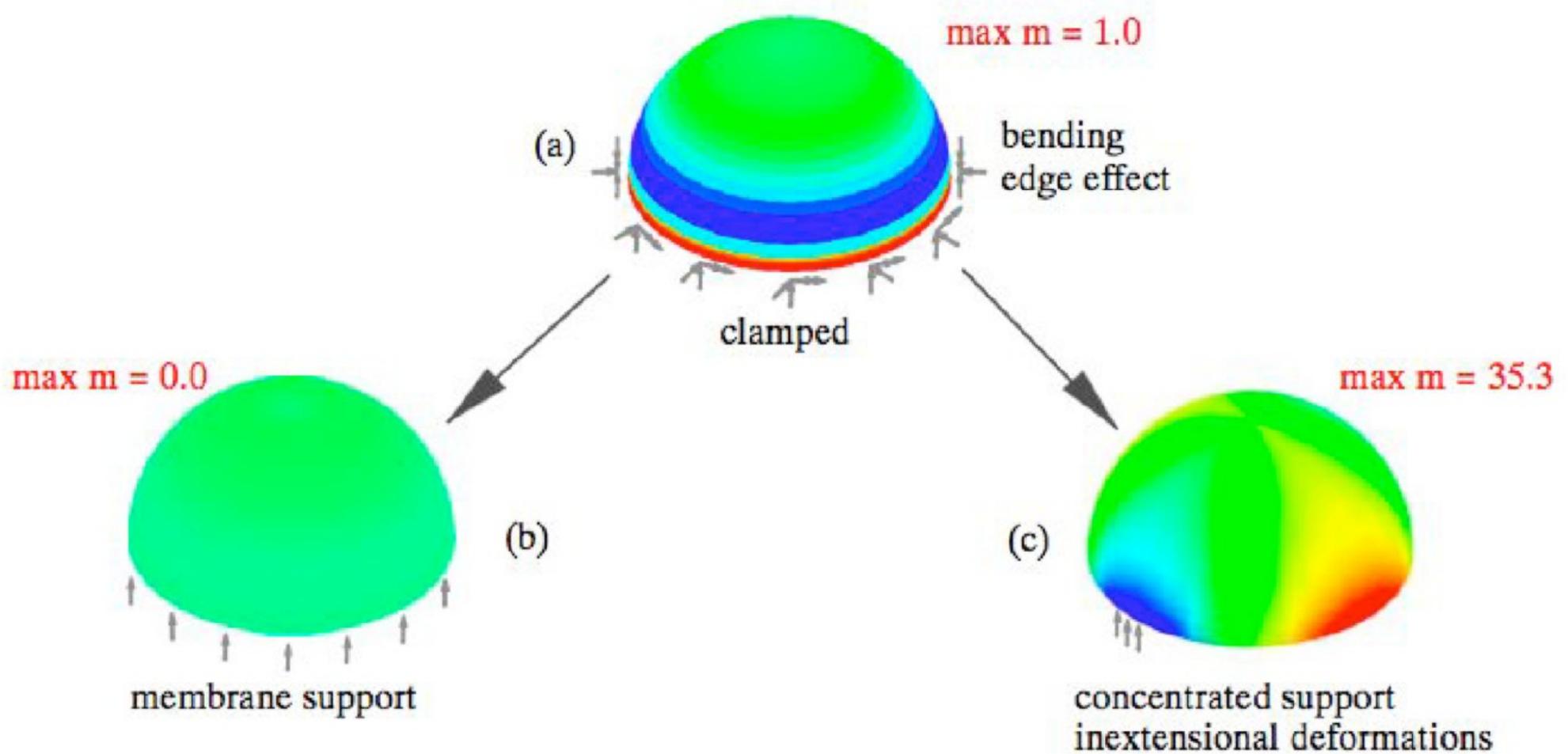
- Coques minces
  - Couplage N-M,
  - 3CLs le long des bords
  - (coques épaisses avec T)
- Membranes
  - Efforts normaux seuls,
  - 1CL le long des bords,
  - la forme ne suit pas nécessairement le chargement.

# Comportement des coques minces



Énergies de déformation dans une hémisphère encastree au bord sous propre poids en fonction du ratio rayon/épaisseur (Ramm et Wall, IJNME 2004).

# Importance des conditions aux limites



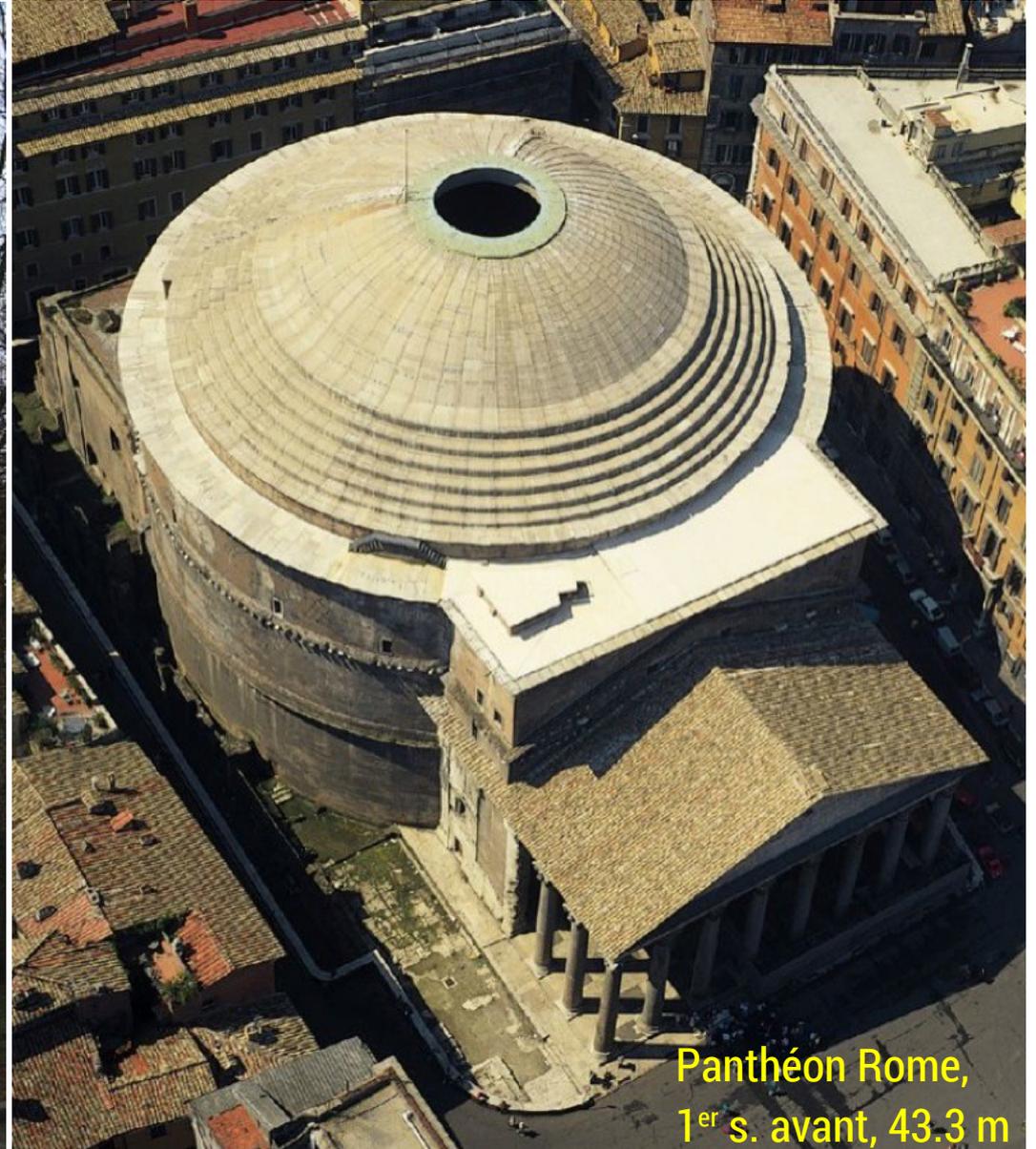
Variation des moments de fléchissants dans la coque en fonction des conditions d'appuis (ibid.)

# Du respect des conditions membranaires aux bords...

---



Planétarium Zeiss d Iéna, 1926  
Ing. Dishinger, 25m de portée, 6cm

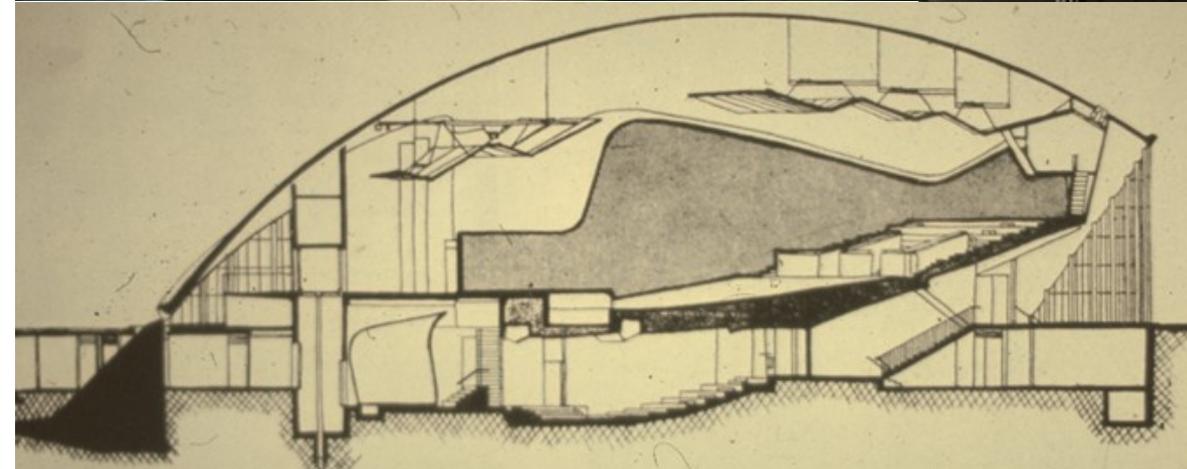
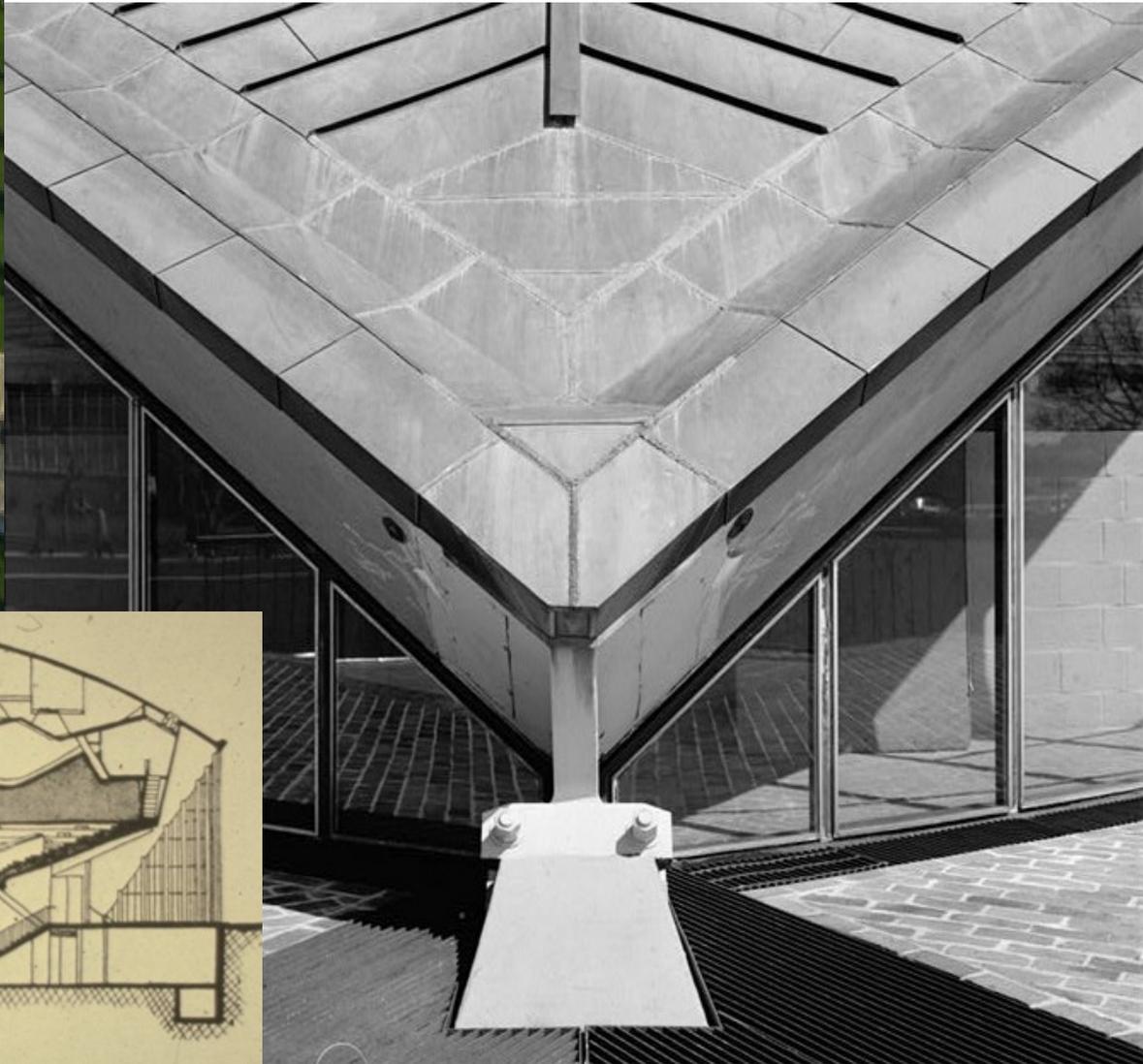


Panthéon Rome,  
1<sup>er</sup> s. avant, 43.3 m

et de leur non-respect...

---

Auditorium Kresge (MIT), Arch. Eero Saarinen (1955)



# Panorama des structures à double courbure

---

Impossible classification :

- Par principe générateur de la géométrie ?
- Par système structurel ?
- Par technologie d'enveloppe ?

Quelles méthodes, quels critères pour l'optimisation ?

Portiques, arcs et poutres courbes

Systemes réticulés

- Coques minces : résilles à maillage triangulaire, quadrangulaire ou composite, précontrainte
- Coques épaisses : treillis spatiaux

Monolithe

# Technologies de couverture

---

## Structure et enveloppe distinctes

- Panneaux plans
- Panneaux à simple courbure  
(cintrés à froid ou à chaud)
- Panneaux à double courbure

## Structure et enveloppe confondues

- Avec préfabrication
- Sans préfabrication

# Principes de génération de la géométrie

---

## Surfaces géométriquement contraintes

- Translation d'une courbe le long d'une autre,
- Rotation d'une courbe autour d'un axe
- Homothétie
- + Combinaisons d'opérations élémentaires
- Objets libres ou non-standard

## Surfaces mécaniquement contraintes

- Systèmes tendus, comprimés ou fléchis

---

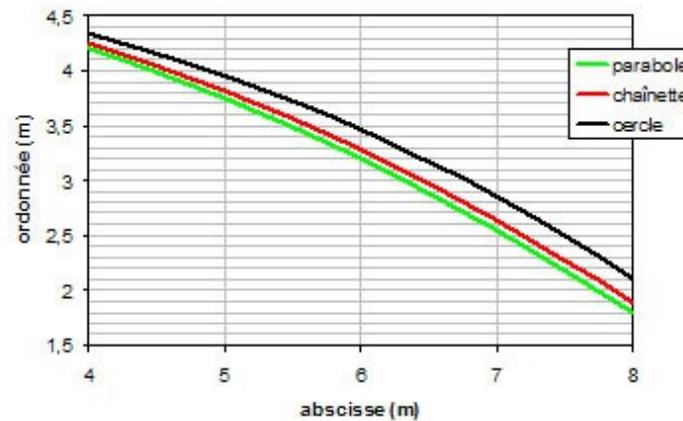
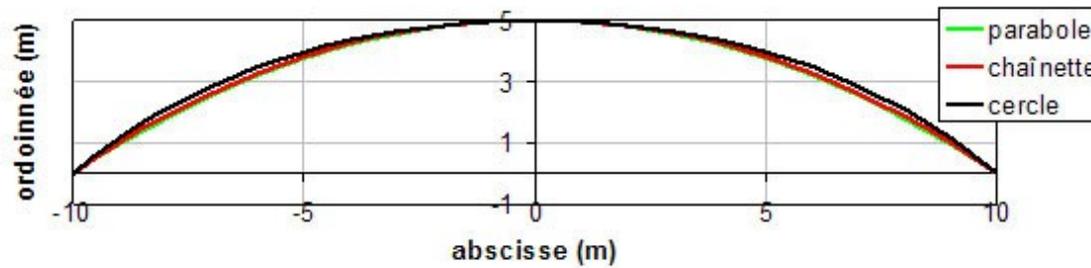
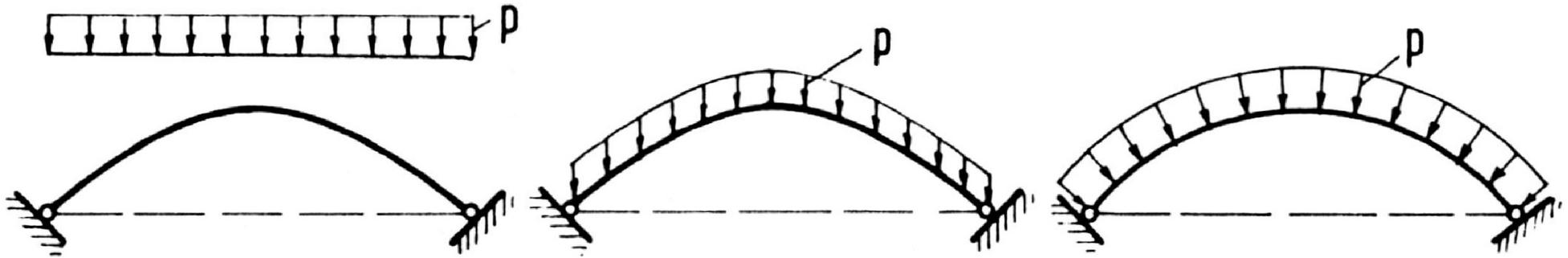
**Systemes porteurs 1 :**  
**Arcs, portiques et poutres courbes**

# Arcs funiculaires

Parabole

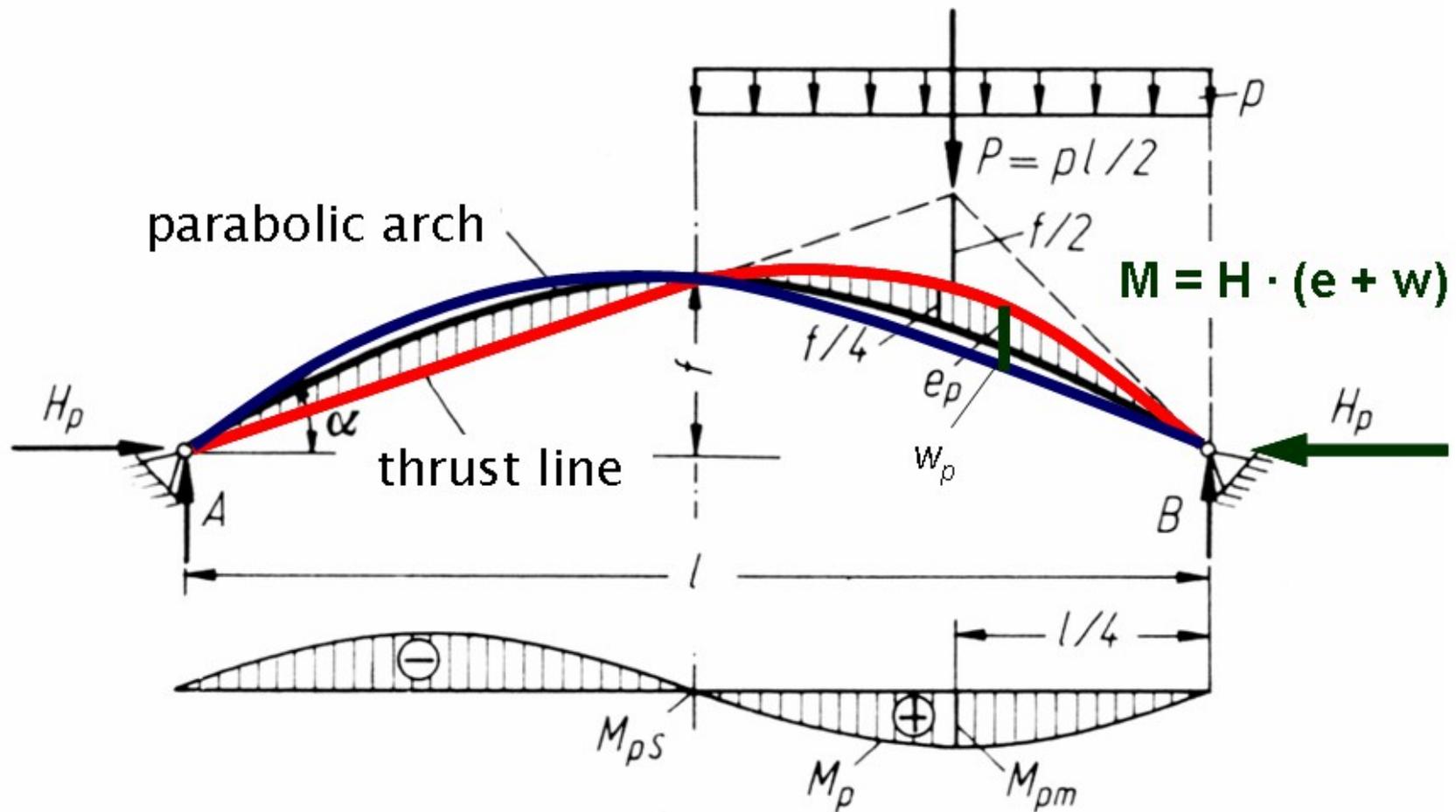
Chaînette

Cercle



# Comportement de type arc

Comment reprendre les chargements dissymétriques ?



# Galleria Victor Emmanuel II à Milan

---

Milan 1878 (Arch. Giuseppe Mengoni)

Arches avec raideur en flexion importante.

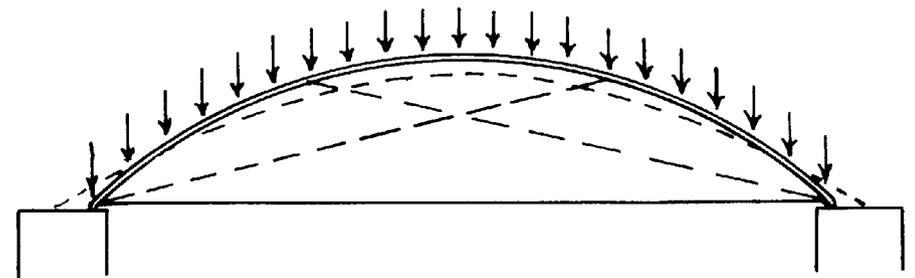
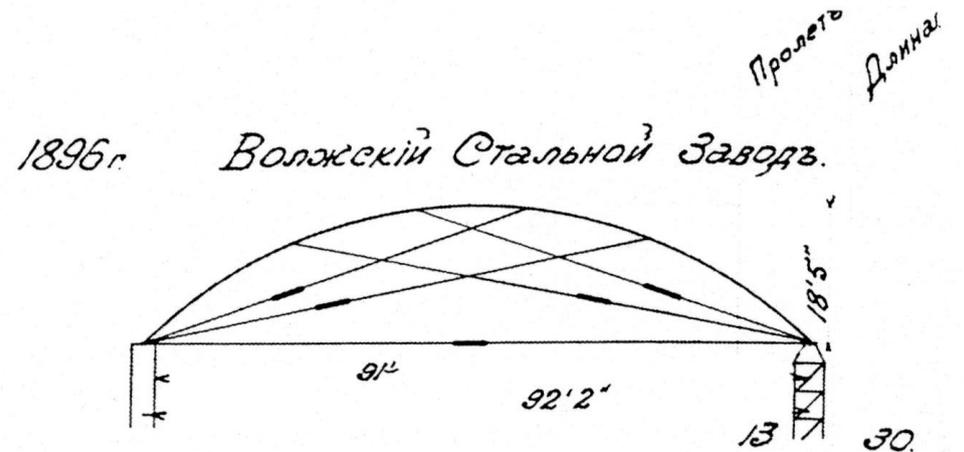


# Gosudarstvennyi Universalnyi Magasin

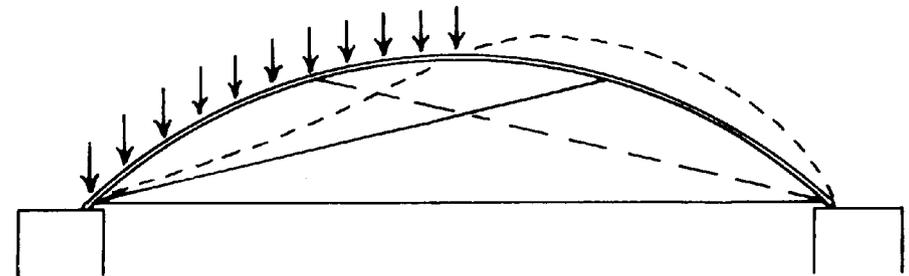
G.U.M. (1893, Moscou)

Ing. Vladimir Choukhov

Arch. Alexander Pomerantsev

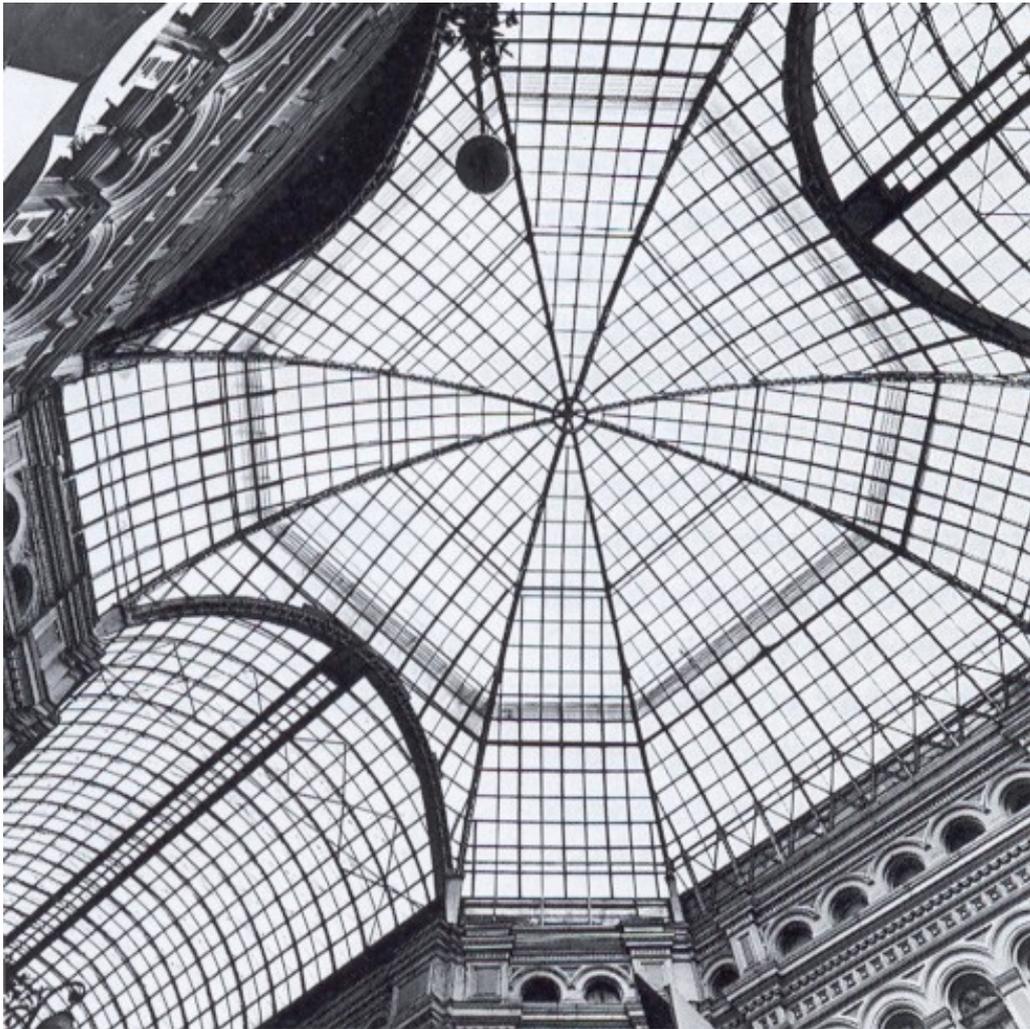


Limitation des déplacements  
par des câbles.



# G.U.M.: Une transparence remarquable

---



# G.U.M. : Détails

---



# Jardin botanique national du pays de Galles (2000)

---



Ing. Anthony Hunt Ass.

Arch. Foster and partners

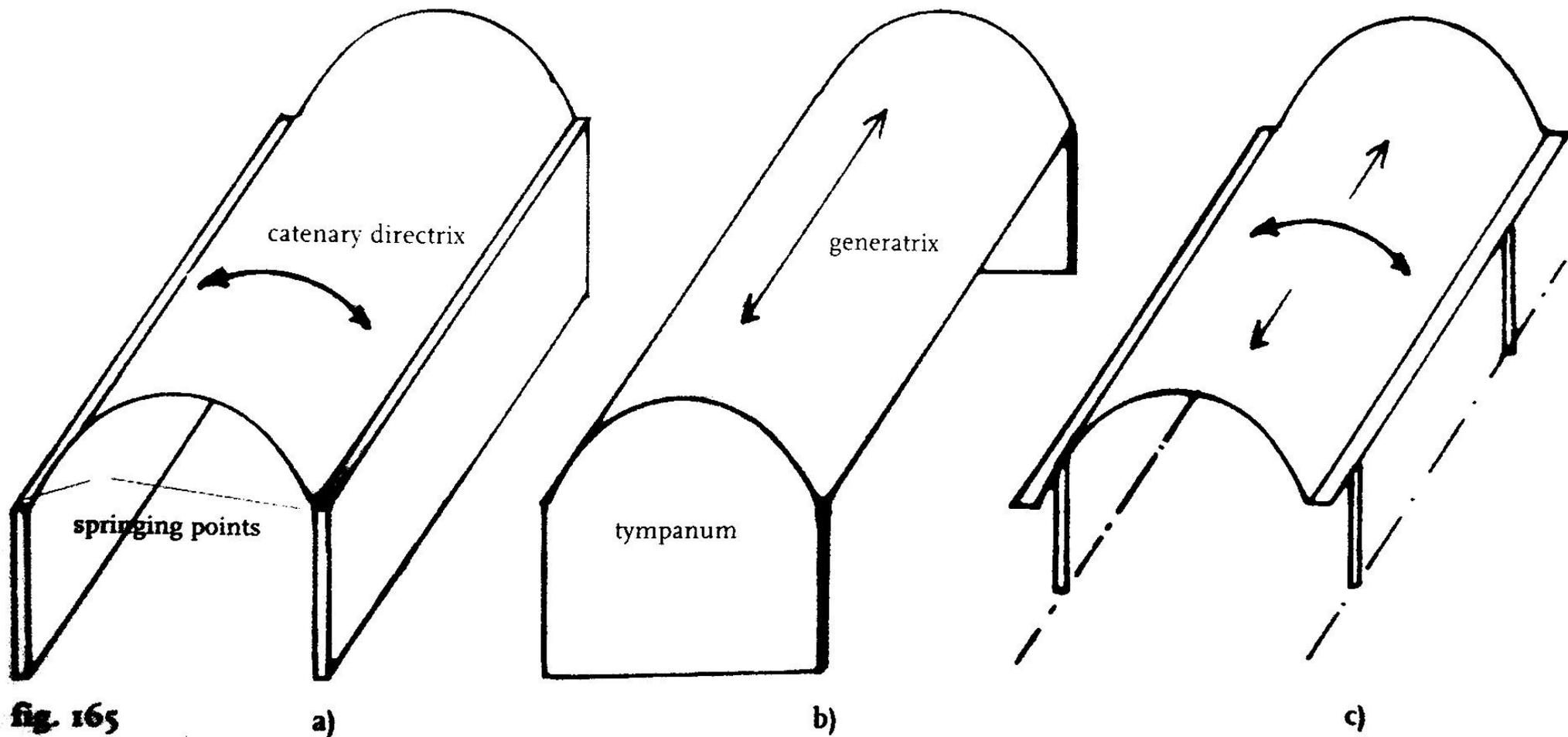


---

**Systemes porteurs 2 :**  
**Systemes réticulés : Gridshells rigides**

# Comportement de type coque

La surface travaille dans deux directions pourvu que sa géométrie soit maintenue.



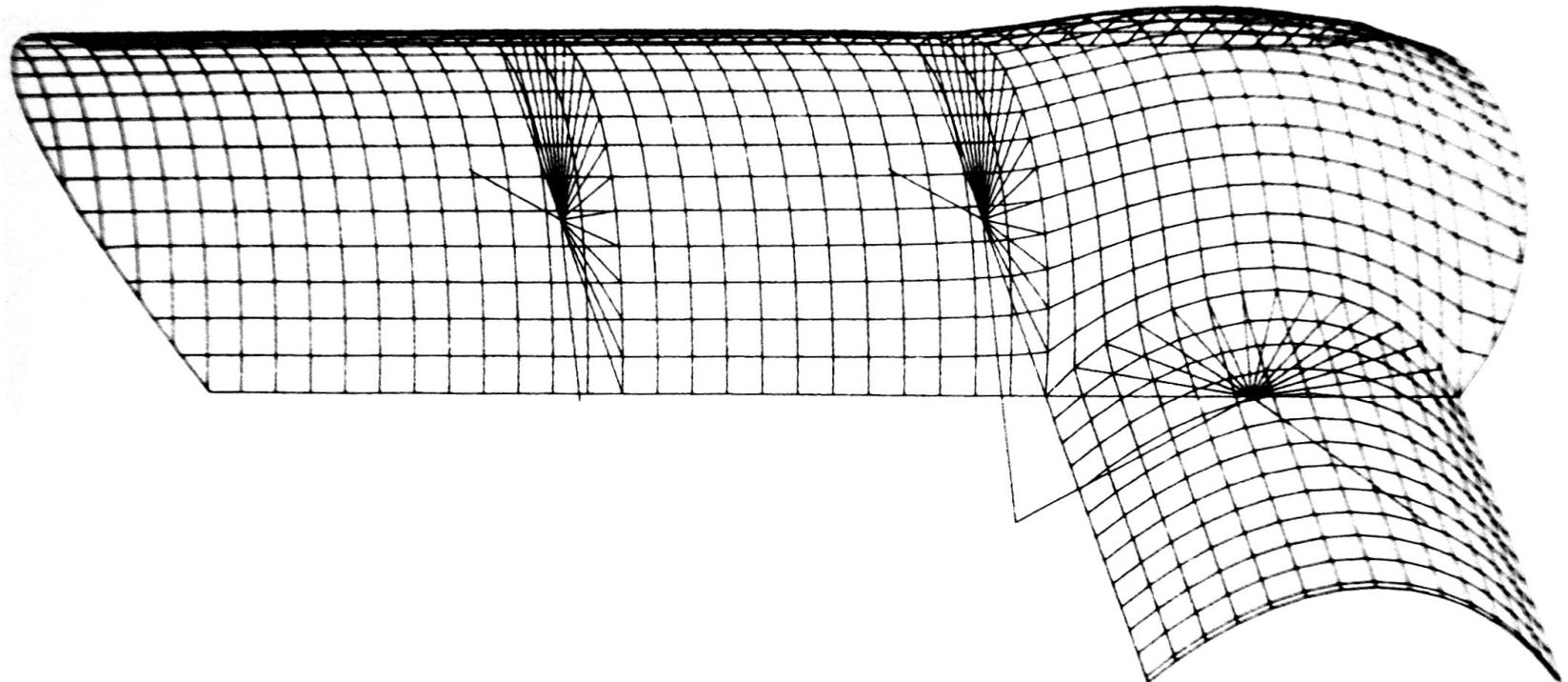
# Coque à simple courbure

---

Couverture de la cour intérieure du Musée Historique de la ville de  
Hambourg, Allemagne, 1989.

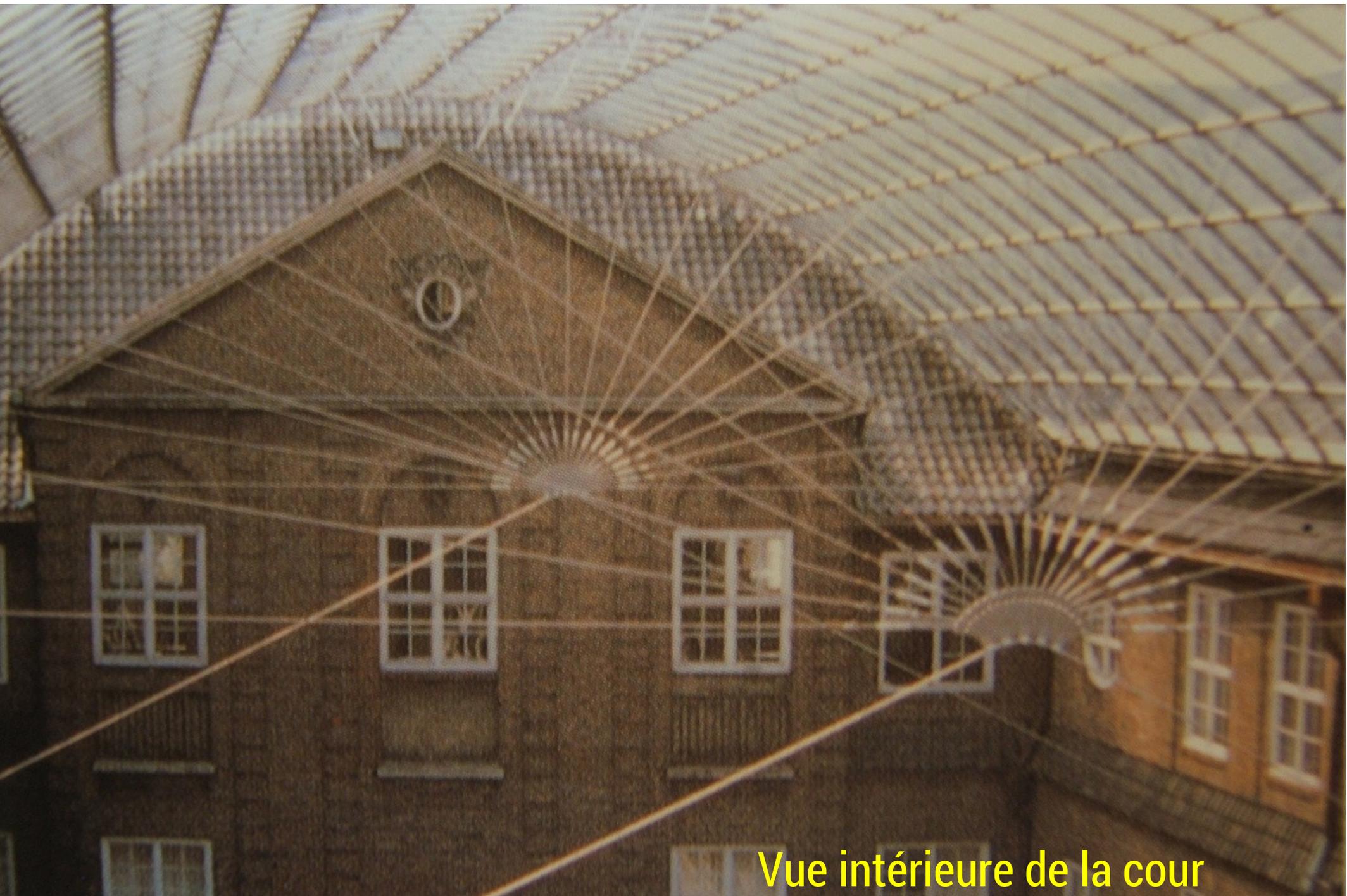
Ingénieur: Schlaich Bergermann und Partners.

Architecte: Volkwin Marg



Vue aérienne de la couverture





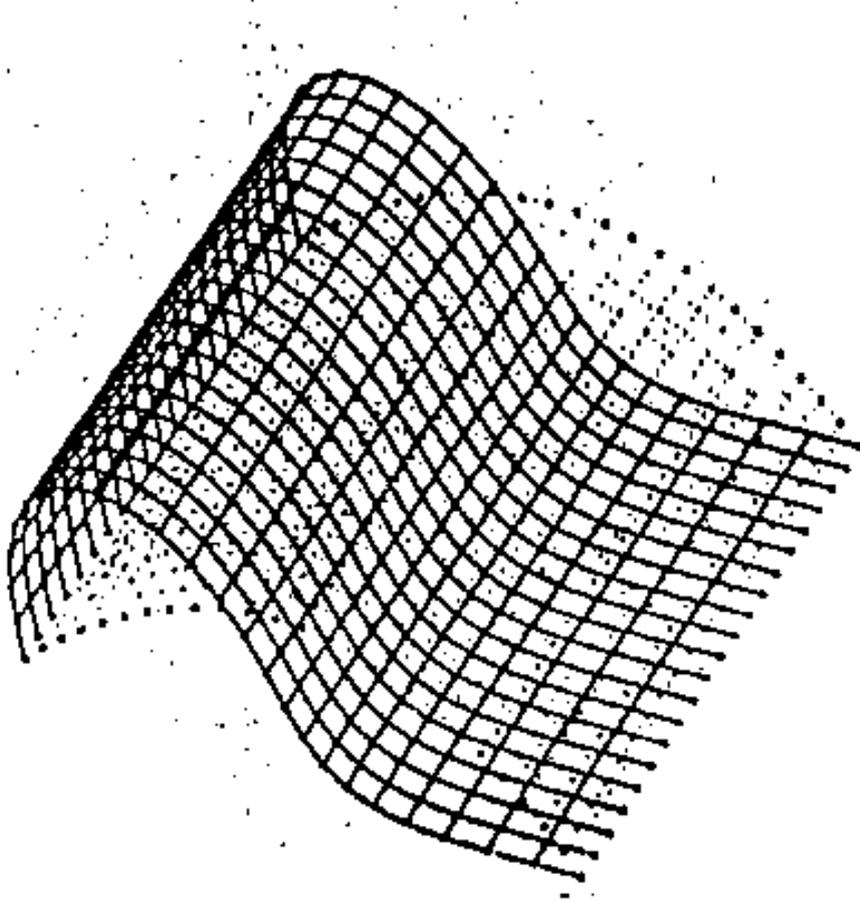
Vue intérieure de la cour



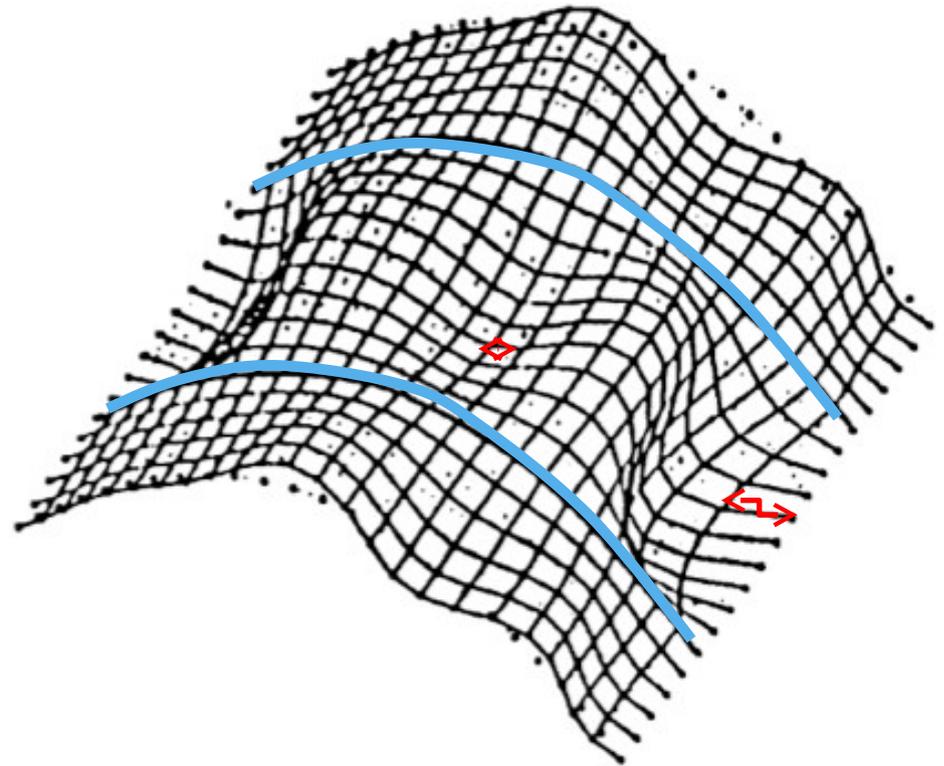
Détail d'un diaphragme en roue de vélo

# De l'importance des conditions aux limites

---



**1<sup>er</sup> mode de flambement,  
gridshell simple (Bulenda)**



**1<sup>er</sup> mode de flambement, avec  
arches rigides (Bulenda)**

# Kogod Courtyard, 2004, Washington dc

---

Arch. Forster & partners, Ing Buro Happold

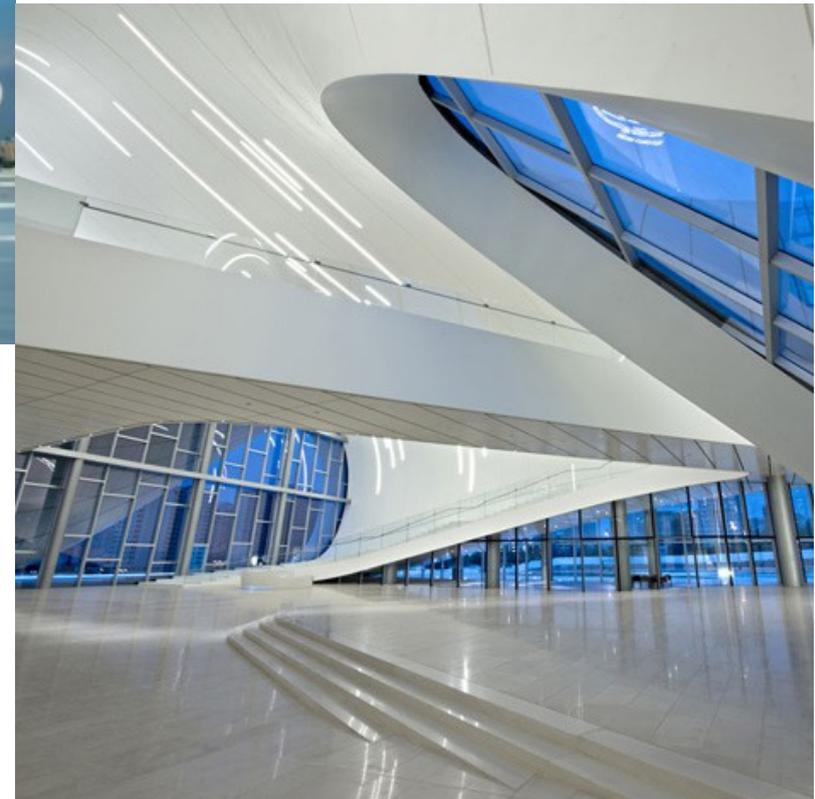


---

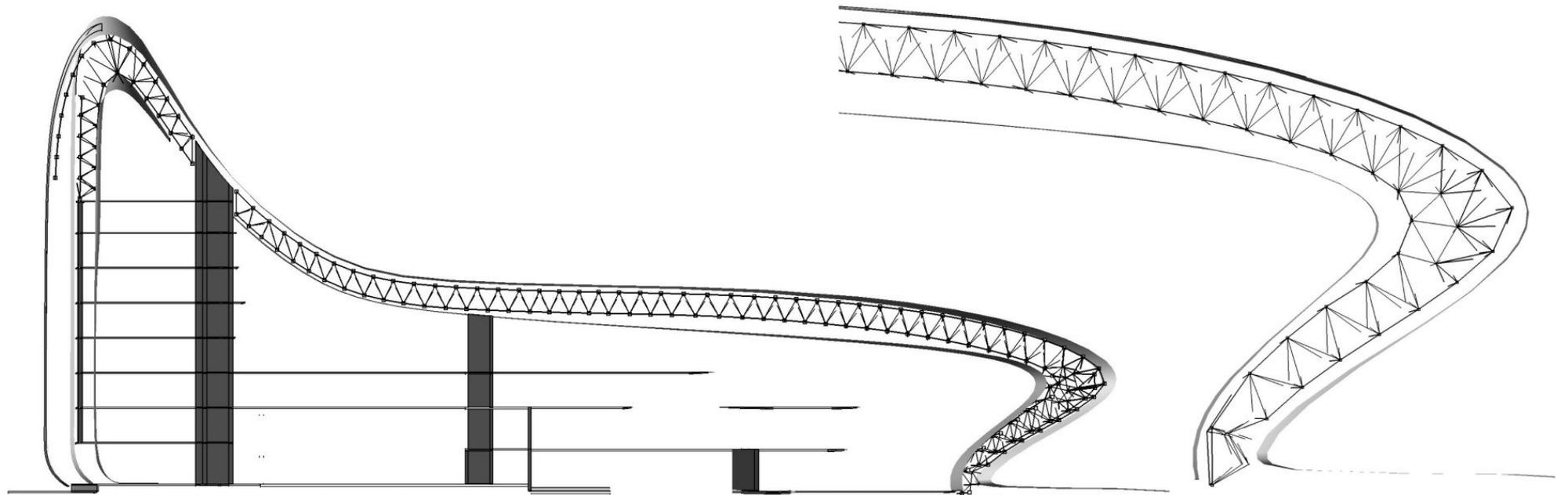
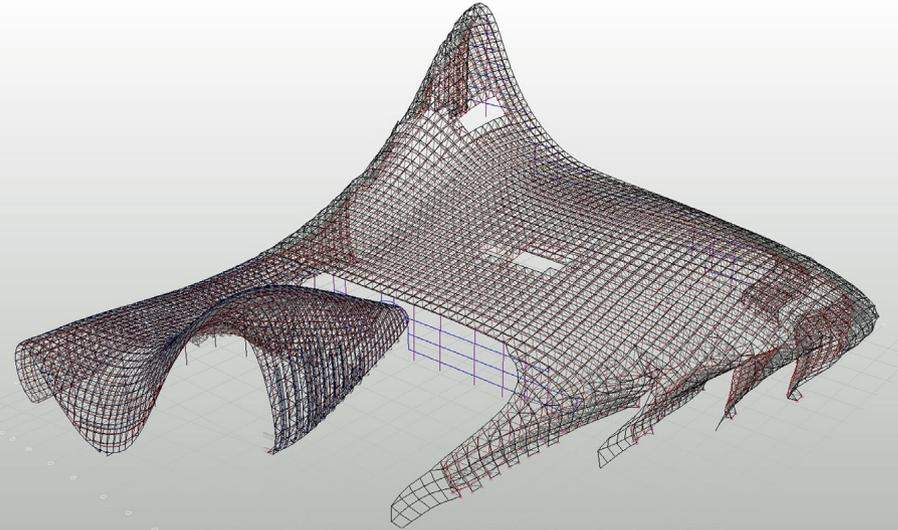
**Systemes porteurs 3 :**  
**Systemes réticulés : Treillis spatiaux**

Centre Culturel H. Aliyev, Bakhu, 2007  
Arch. Zaha Hadid, Ing. MERO-TSK (J. Sanchez)

---



# Centre Culturel H. Aliyev, Bakhu, Arch. Zaha Hadid, Ing. MERO-TSK (J. Sanchez)

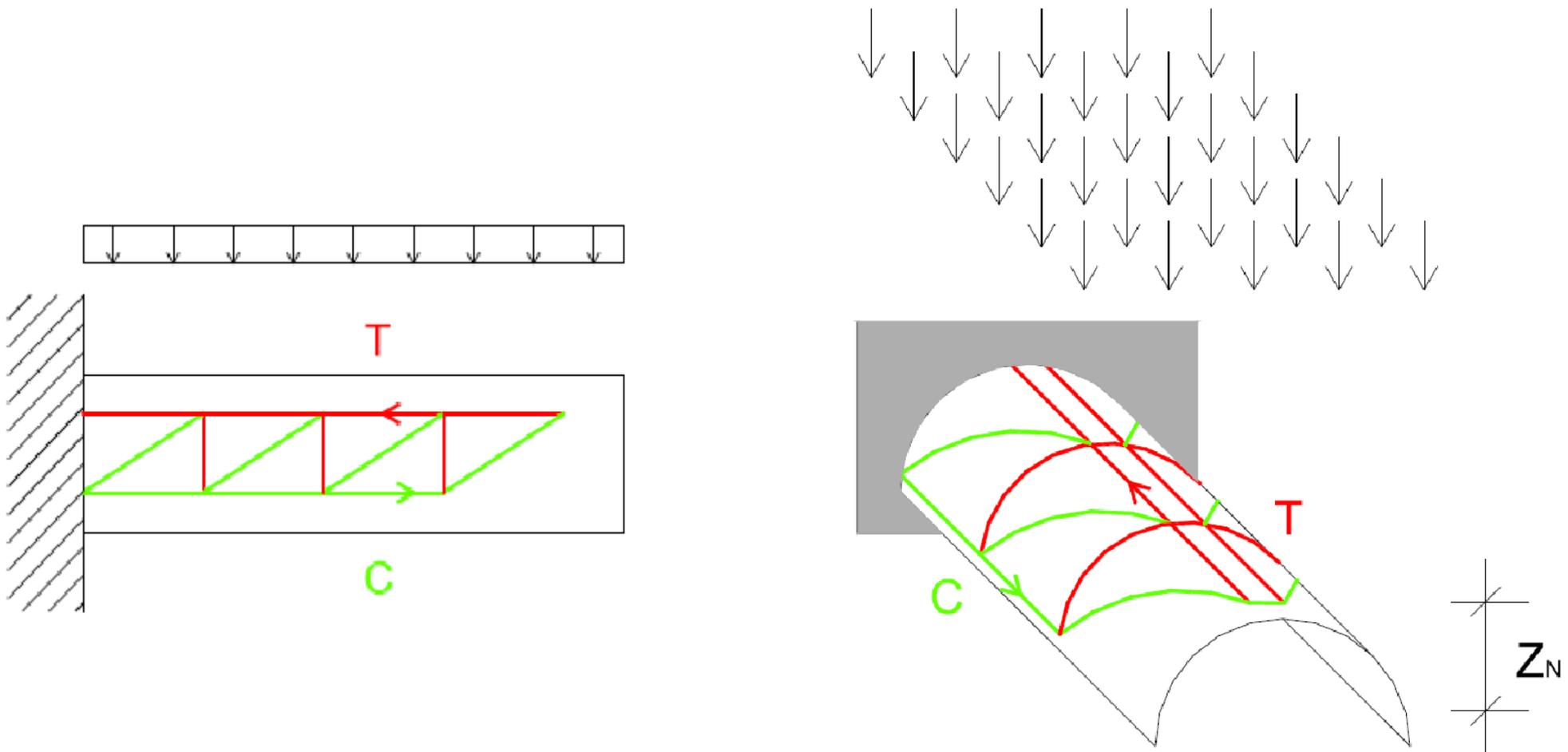


---

# **Systemes porteurs 4 : Structures monolithiques**

# Comportement de type coque

Modèle en bielles et tirants d'une coque en cantilever  
=> transfert des charges verticales sans flexion



# Coque à simple courbure : Exemple 1

---

Massaro agroindustries, Uruguay, 1976-1980.

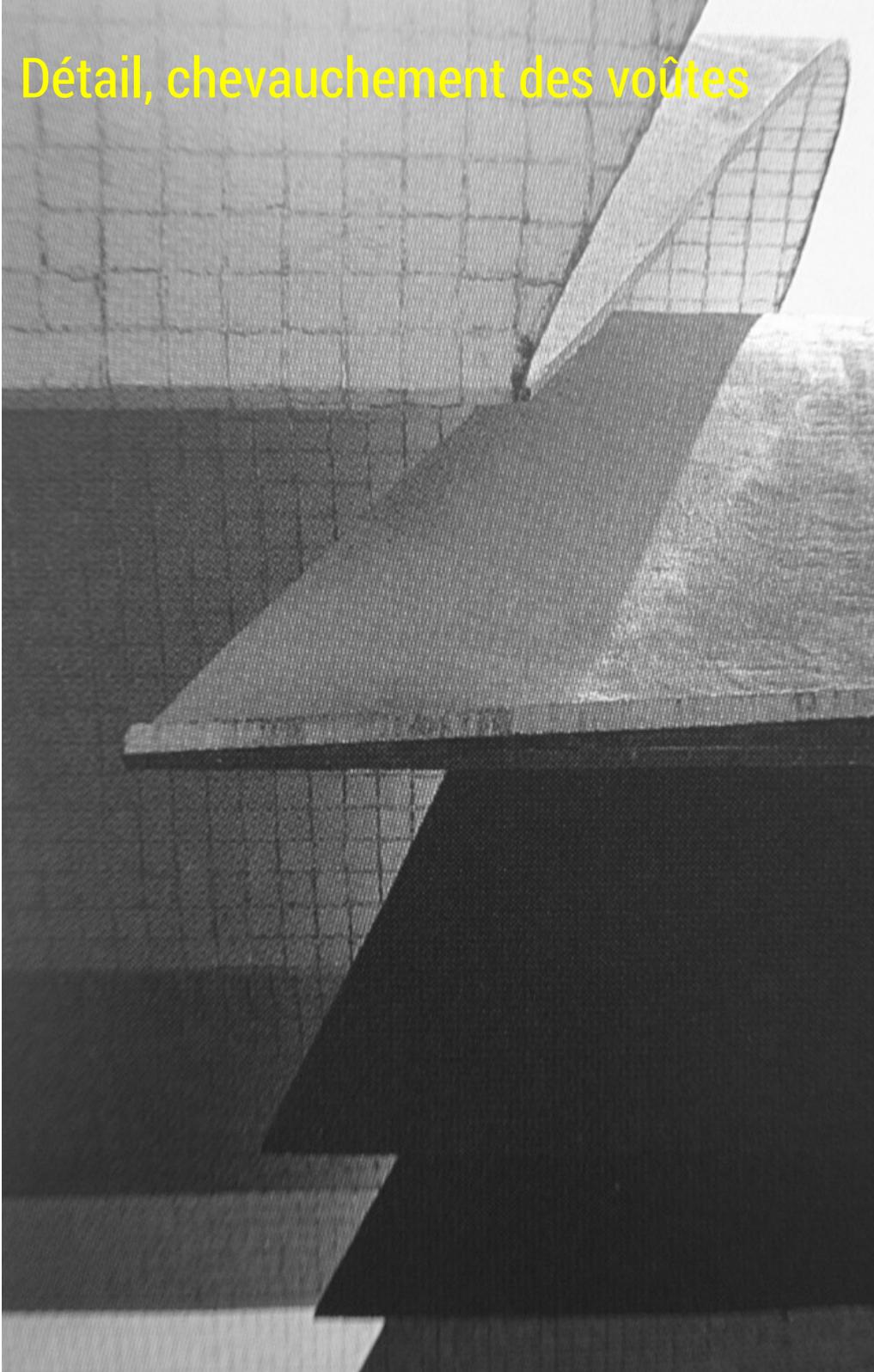
Ingénieur: Eladio Dieste.

Portique avant: 17m de portée et 16m de porte-à-faux.



Vue intérieure

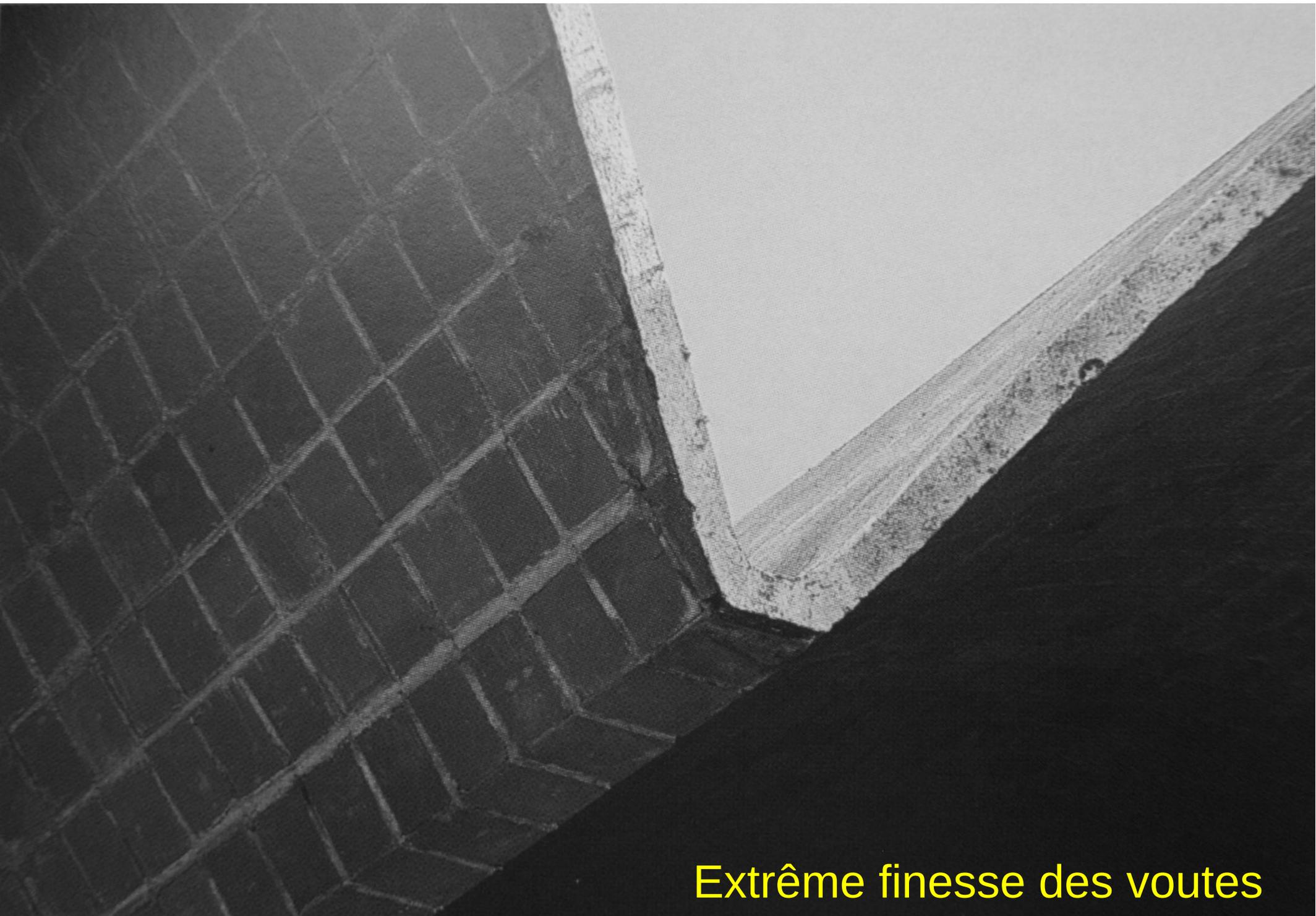




Détail, chevauchement des voûtes



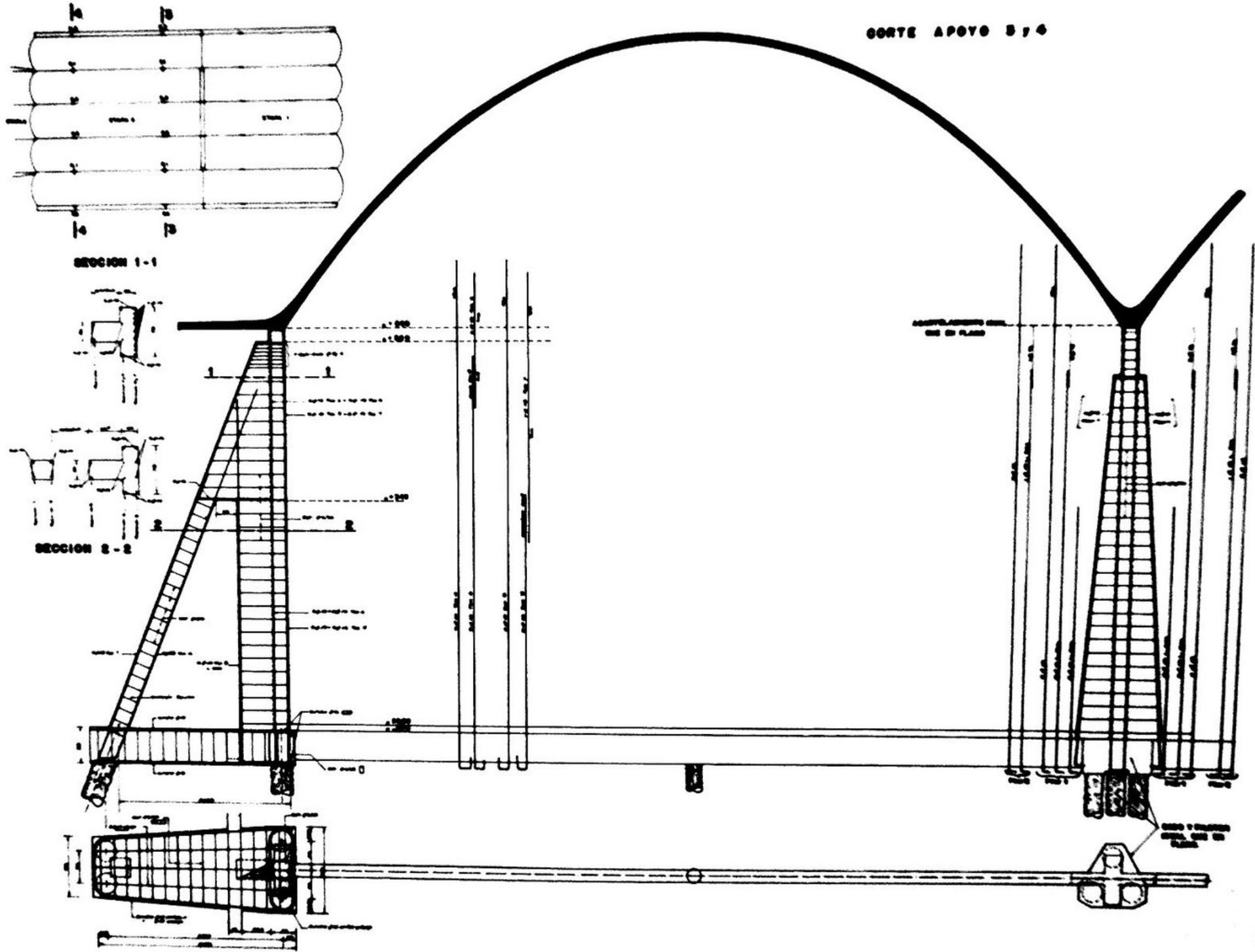
Détail, poutre de rive



Extrême finesse des voutes

# Coupe sur appuis

CORTE APOYO B 7 6





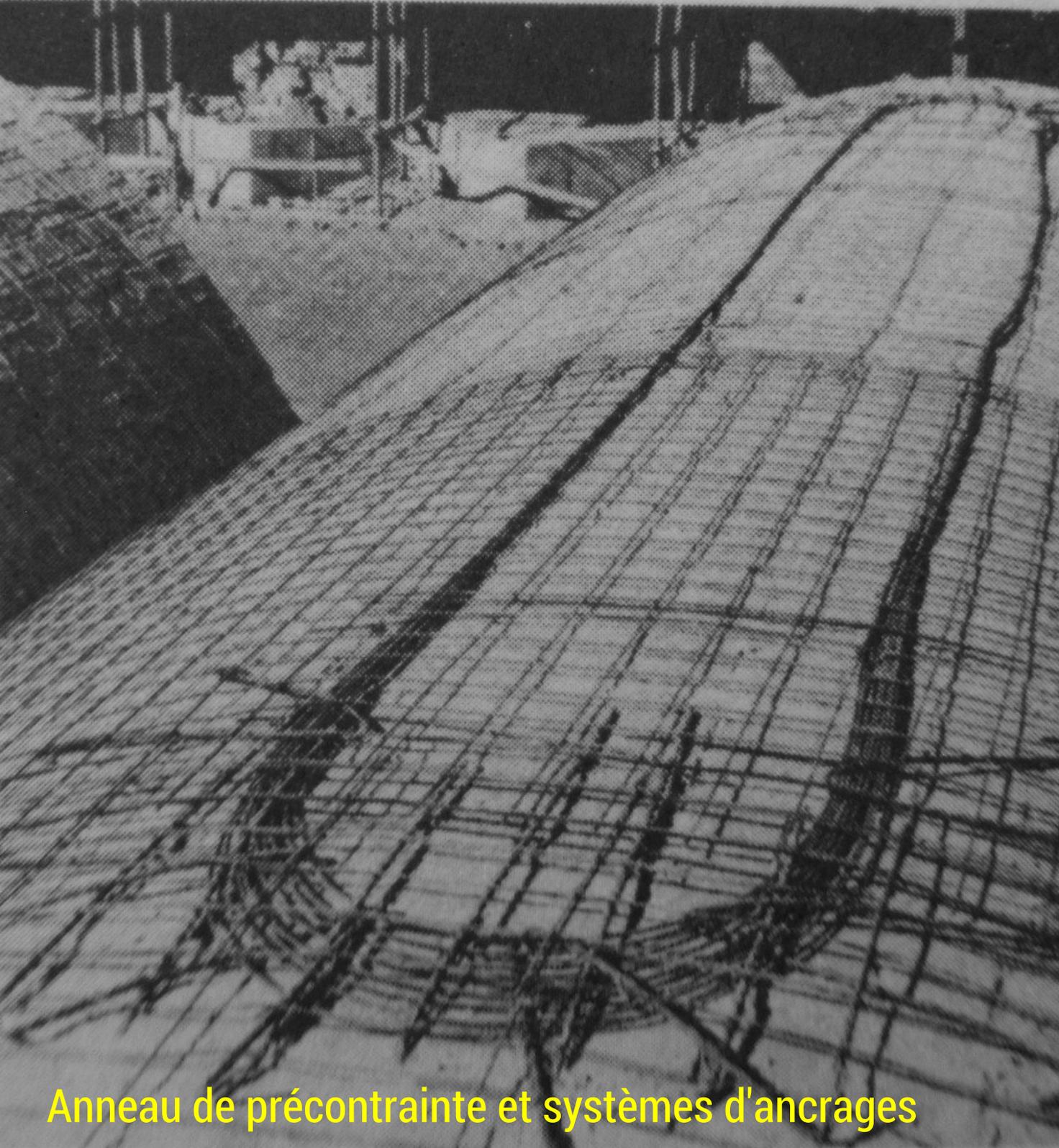
Vue du chantier



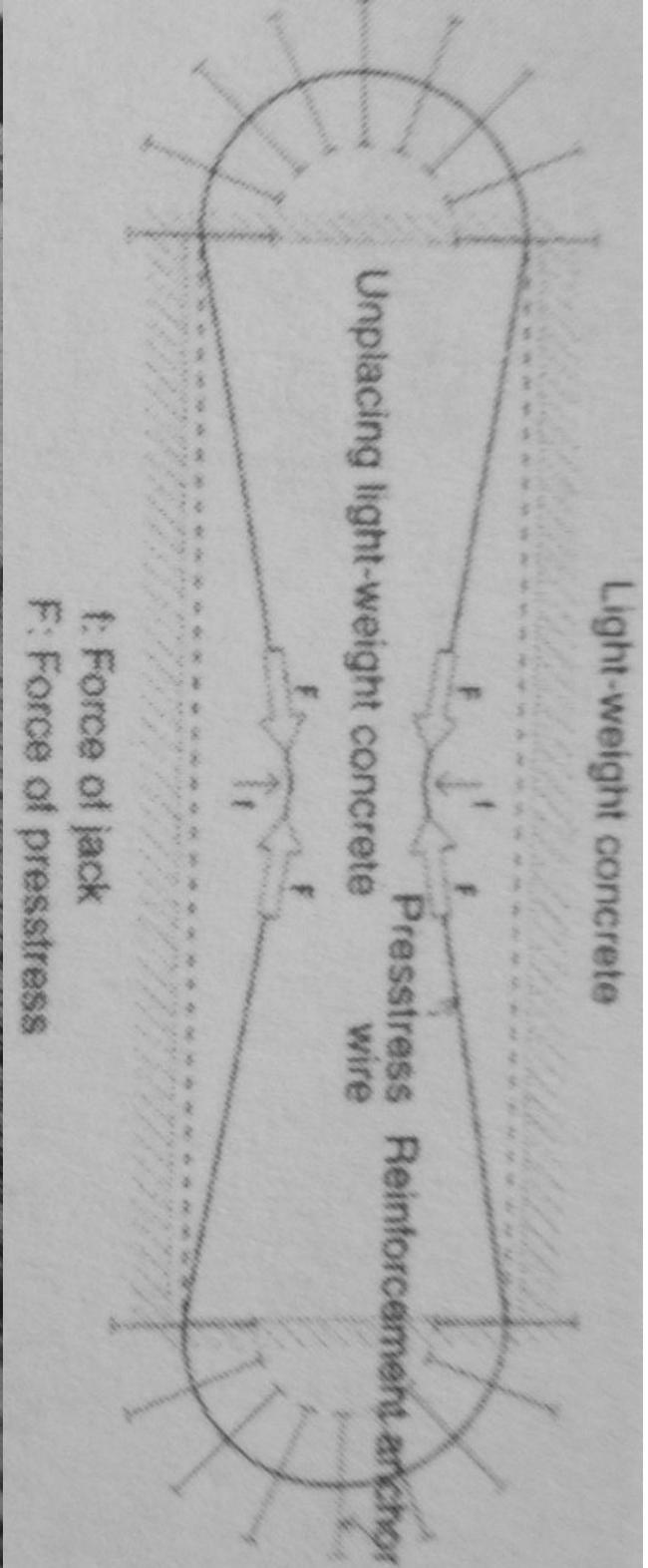
Un des cintres amovibles sur rails



Ouvriers positionnant les briques sur le cintre avant l'installation du ferrailage et du mortier.



Anneau de précontrainte et systèmes d'ancrages





Mise en précontrainte des aciers avec vérin mécanique

# Technologies de couverture

---

## Structure et enveloppe distinctes

- Panneaux plans
- Panneaux à simple courbure  
(cintrés à froid ou à chaud)
- Panneaux à double courbure

## Structure et enveloppe confondues

- Avec préfabrication
- Sans préfabrication

---

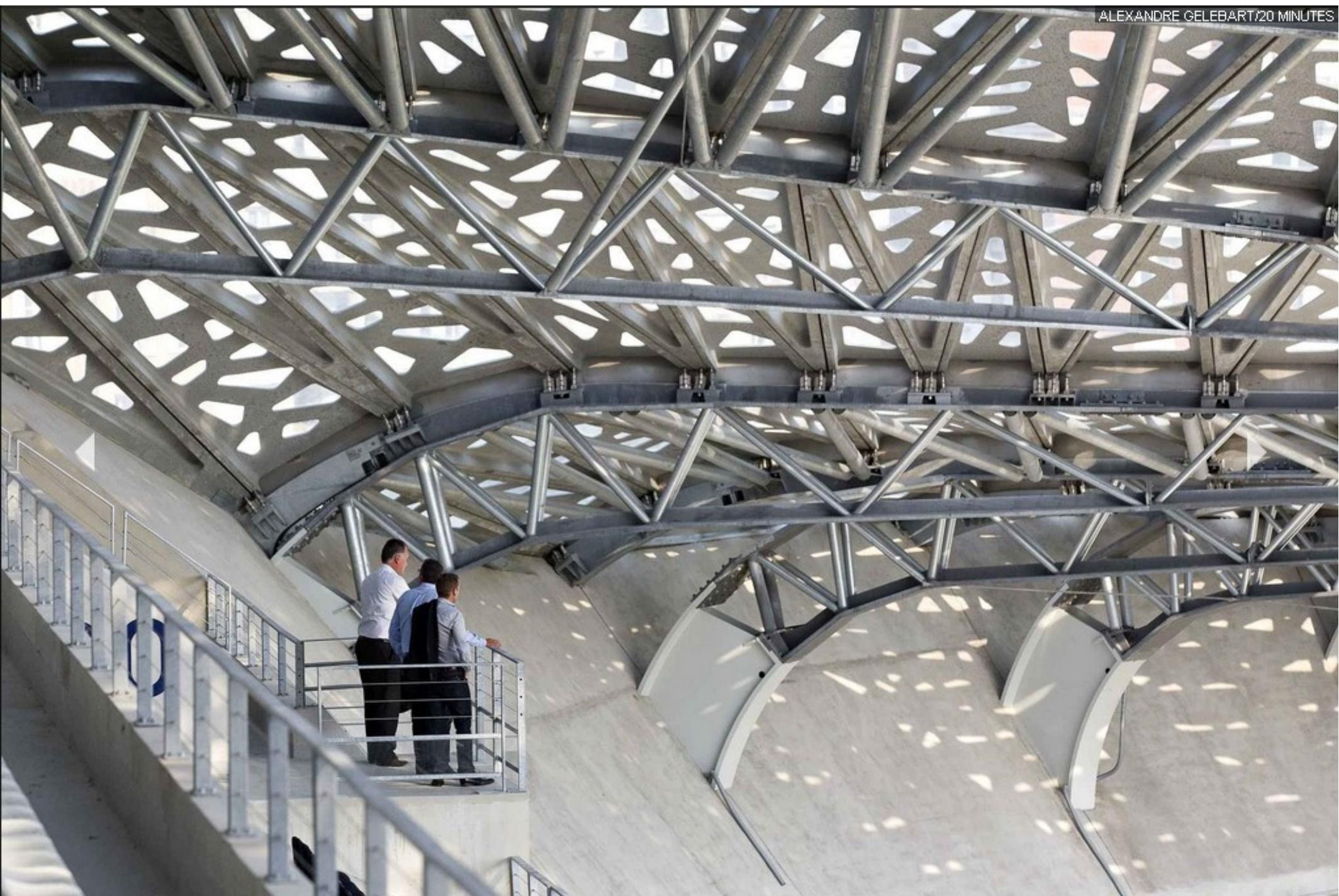
**Technologies couvertures 1 :**  
**Structure et enveloppe distinctes**  
**Panneaux triangulaires plans**

# Stade Jean Bouin, Paris, 2013, Arch. Ricciotti, Ing. Lamoureux & Ricciotti

---







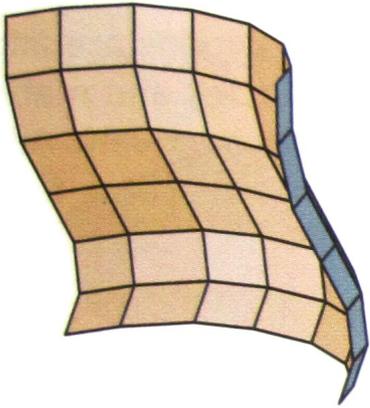
---

**Technologies couvertures 2 :**  
**Structure et enveloppe distinctes**  
**Panneaux quadrangulaires plans**

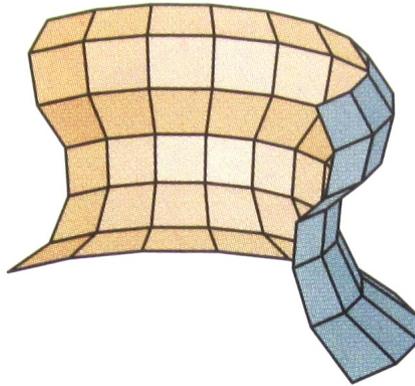
# Principales méthodes de génération de surfaces à quadrangles plans

---

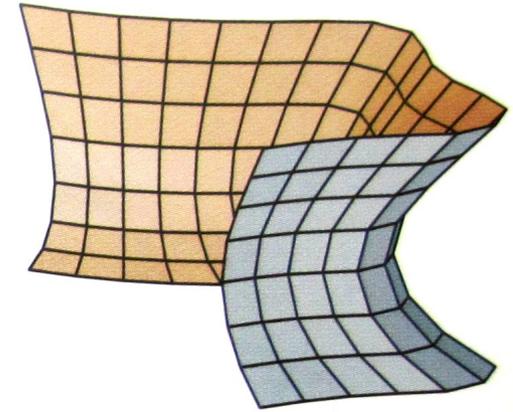
*discrete translational surface*



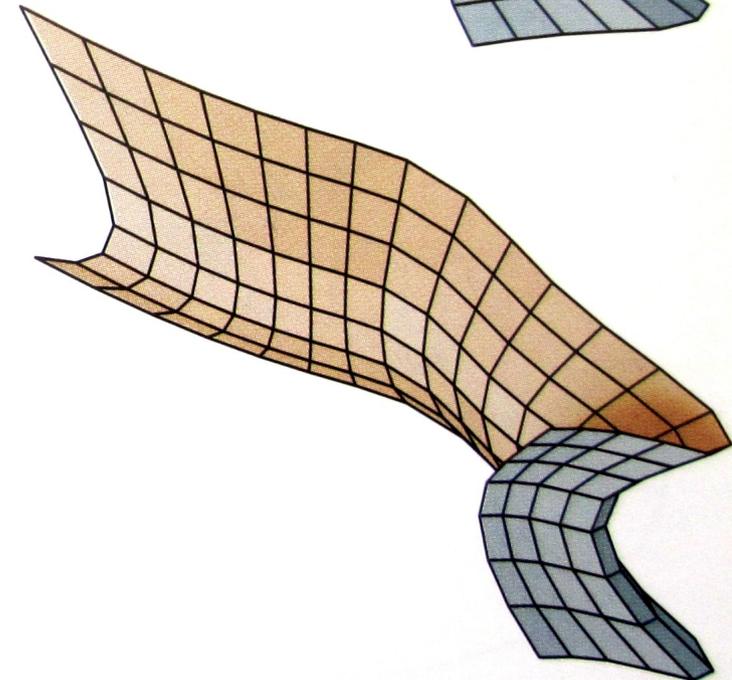
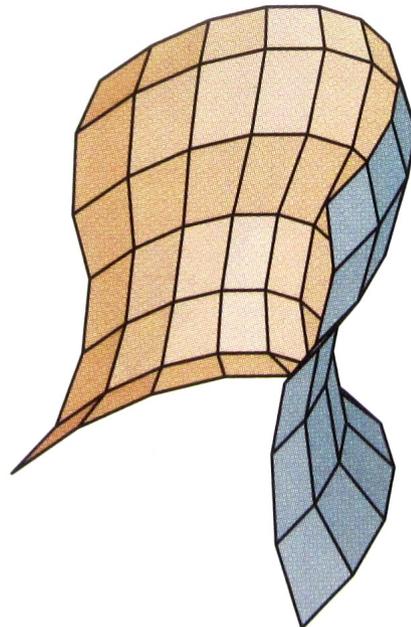
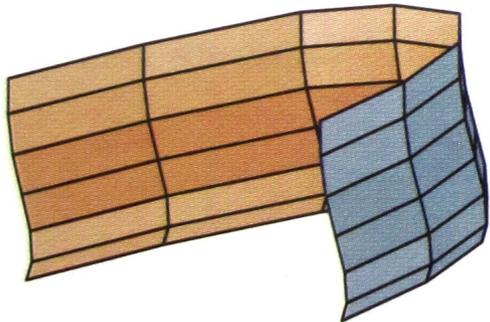
*discrete rotational surface*



*discrete moulding surface*



*affine images*



# The Sage Gateshead, Gateshead, Fosters and p., 2004







# Kogod Courtyard, Fosters & Happold 2007



# Yas Island Marina Hotel, Abu Dhabi, 2008

---

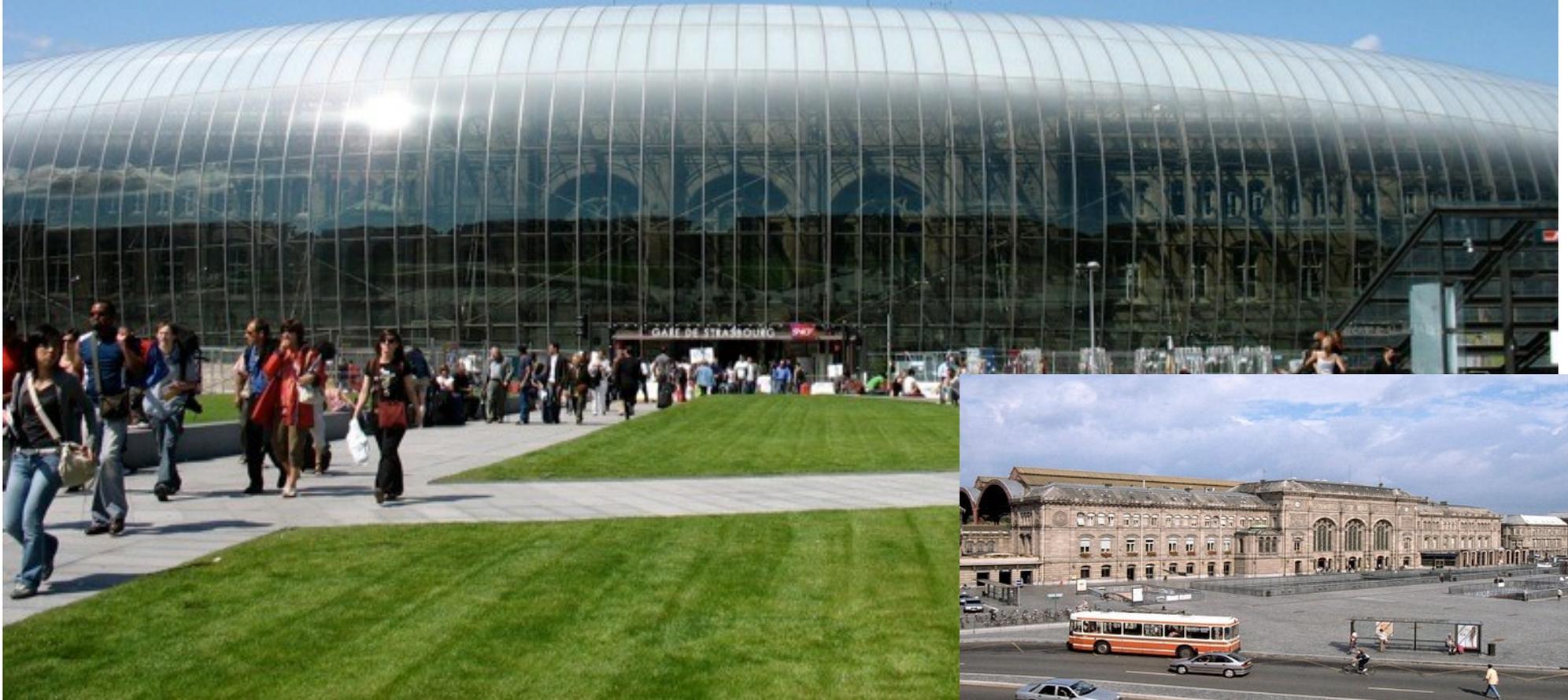
Arch. Asymptote, Ing. Waagner Biro + Evolute



---

**Technologies couvertures 3 :**  
**Structure et enveloppe distinctes**  
**Panneaux cintrés à froid**

# Extension gare de Strasbourg, AREP, RFR 2007

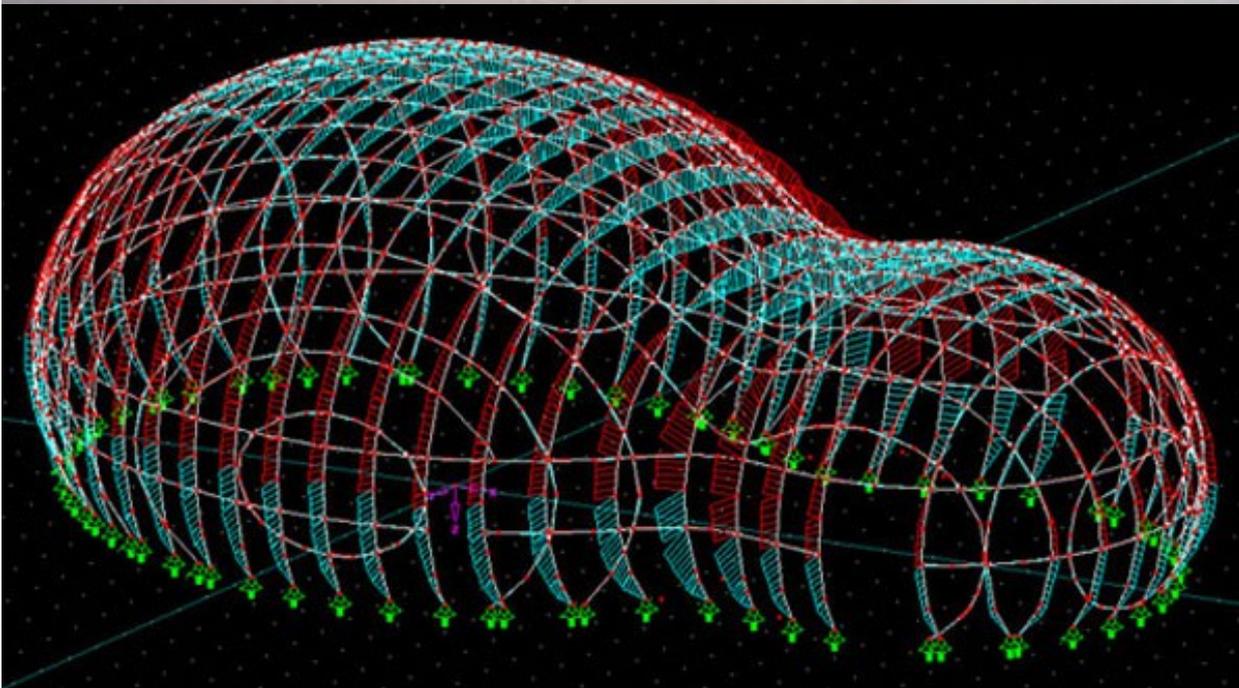




---

**Technologies couvertures 4 :**  
**Structure et enveloppe distinctes**  
**Panneaux à double courbure**

# The bubble, Frankfurt, 1999 Arch. Franken



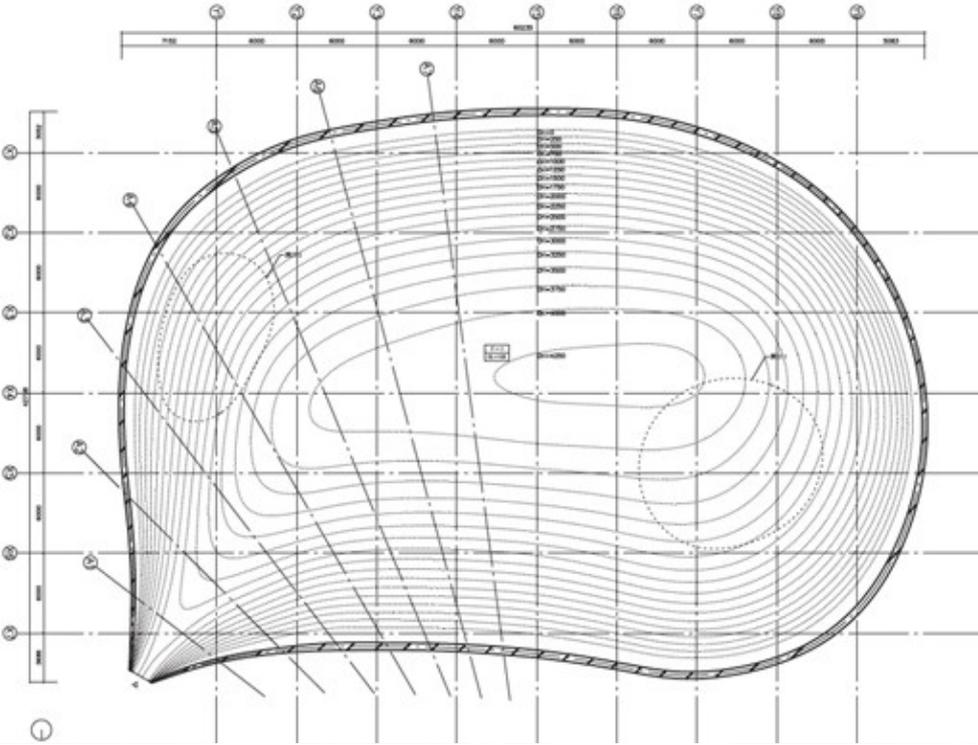
---

**Technologies couvertures 5 :  
Structure et enveloppe confondues  
sans préfabrication**

# Teshima museum, (2010) Japon, Arch. Ryue Nishizawa, Art. Rai Nato, Ing. Mutsuro Sasaki







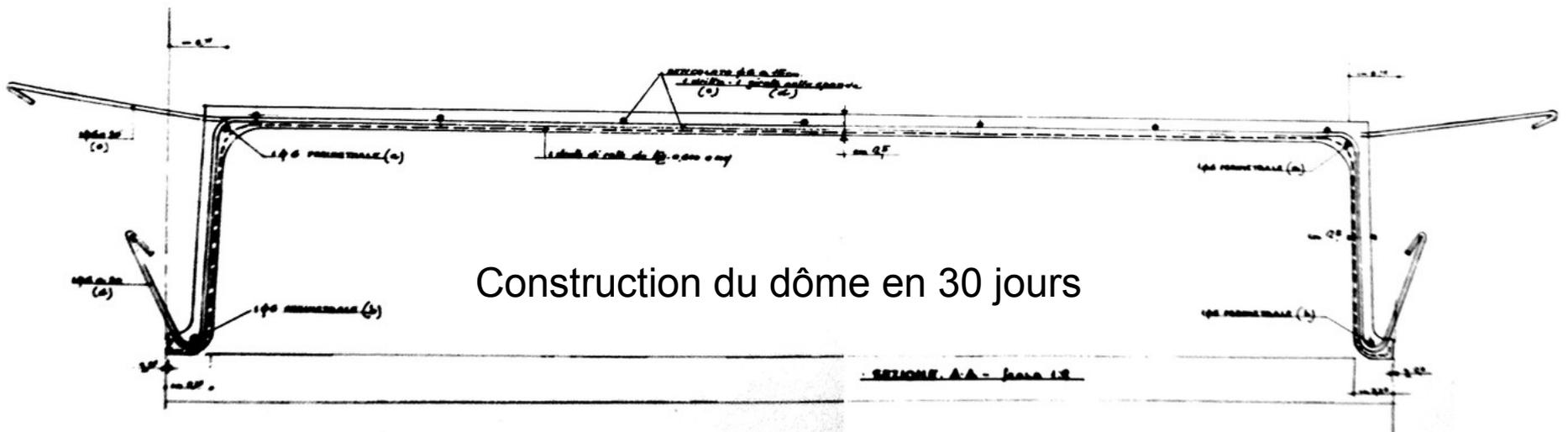
---

**Technologies couvertures 6 :  
Structure et enveloppe confondues  
avec préfabrication**

# Palazzetto dello Sport, Ing. Pier Luigi Nervi, 1957





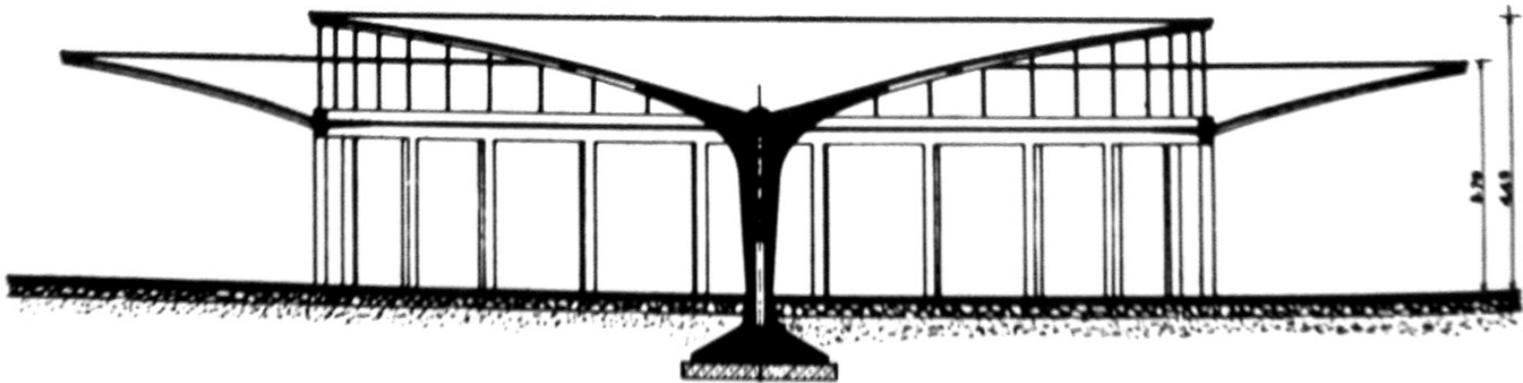
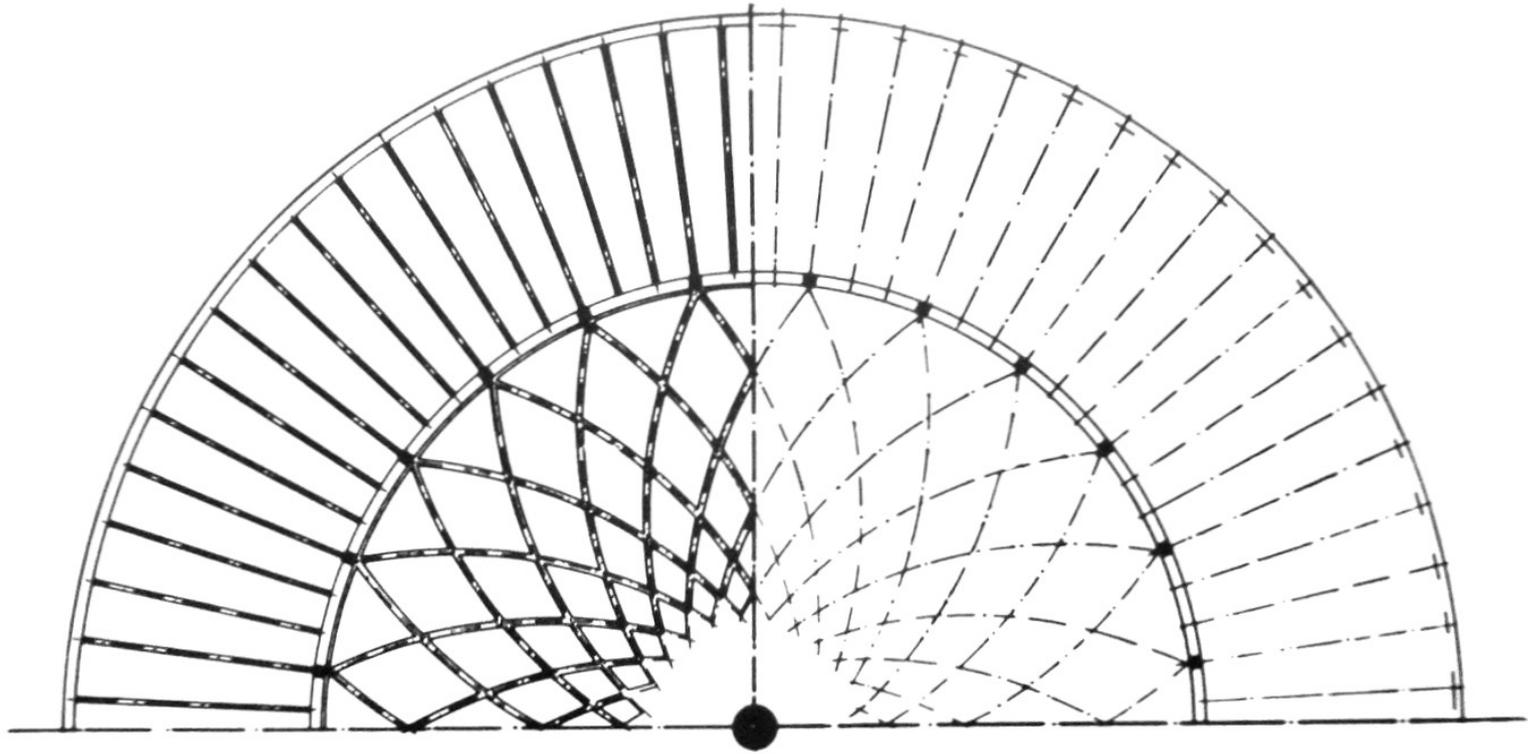


Construction du dôme en 30 jours

# Kursaal pavillion, Pier Luigi Nervi, 1950

---





# Yitzhak Rabin Centre, Tel Aviv 2004

Moshe Daye Arch., Ing Octatube



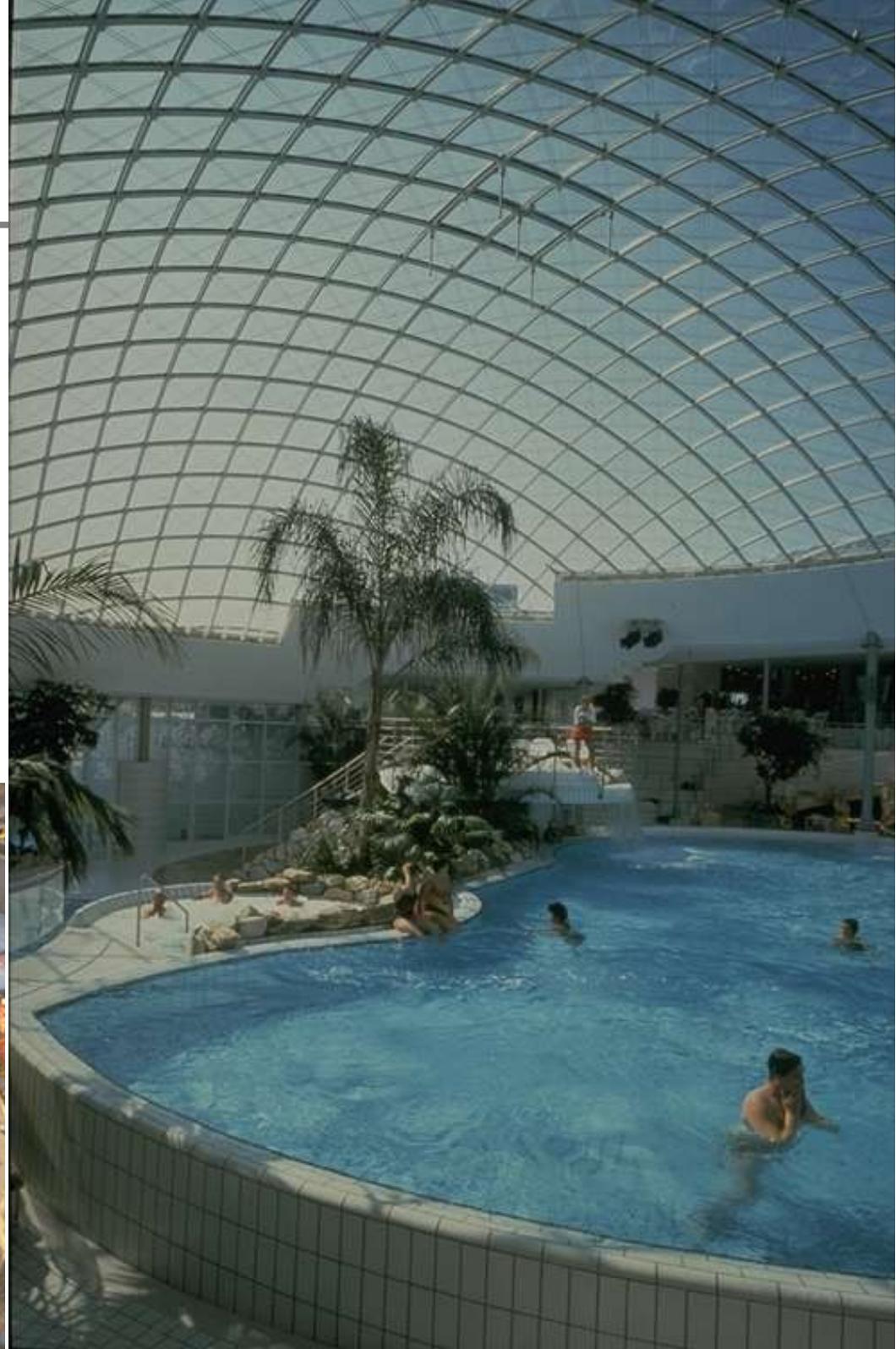


---

# Stratégies d'optimisation géométrique

---

# Piscine de Neckarsulm, SBP, 1989

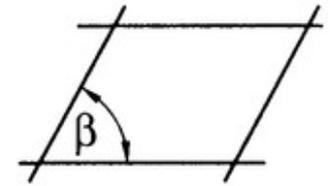
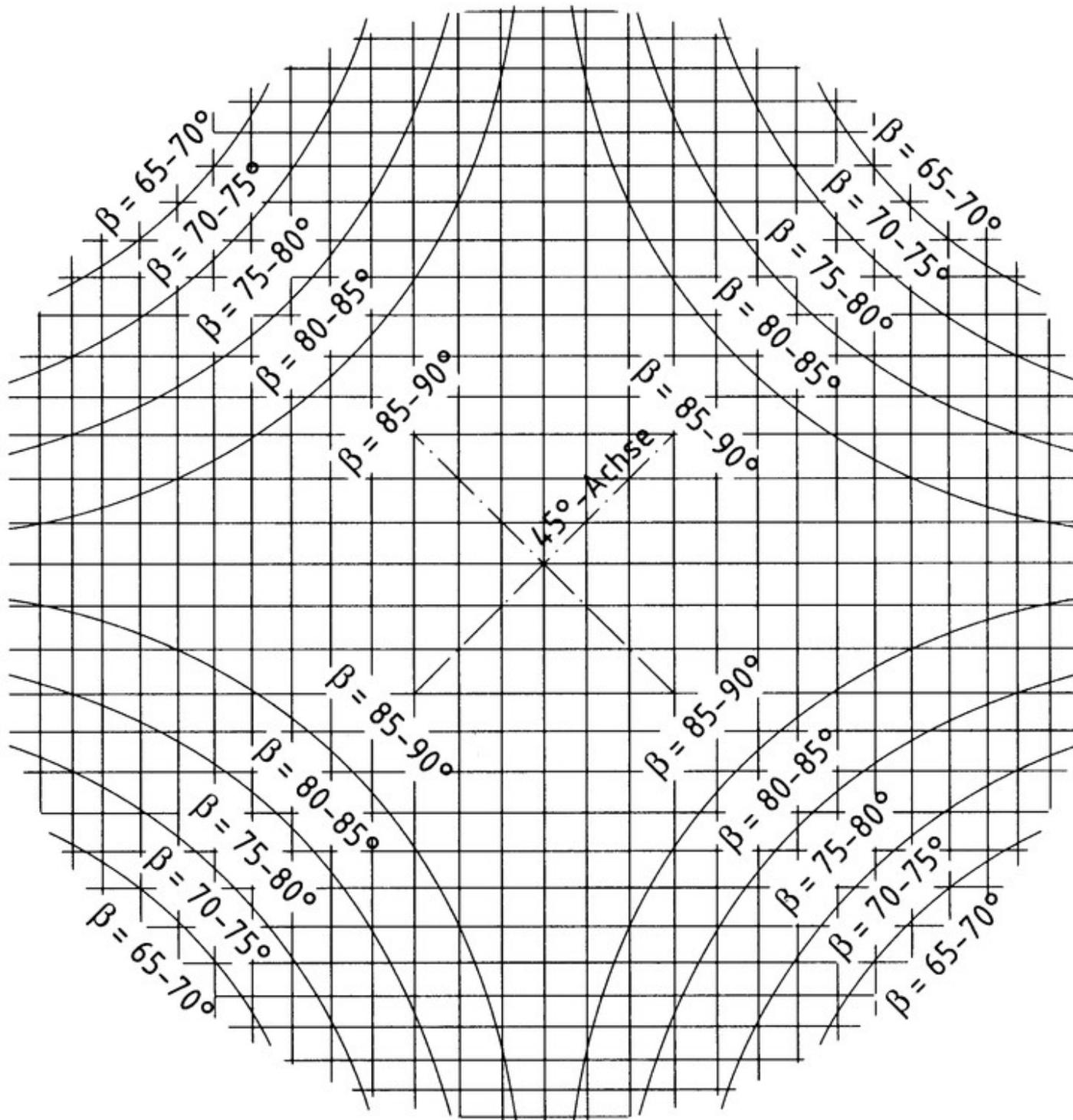




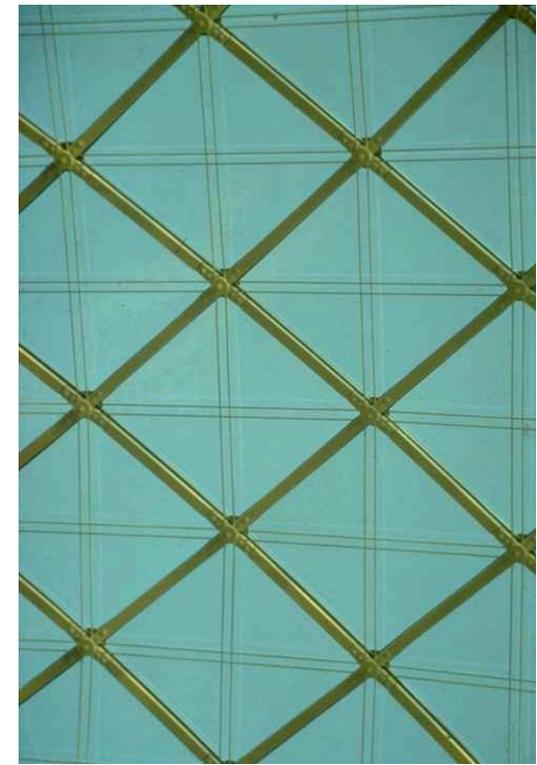
---

Des barres et,  
des assemblages tous  
identiques

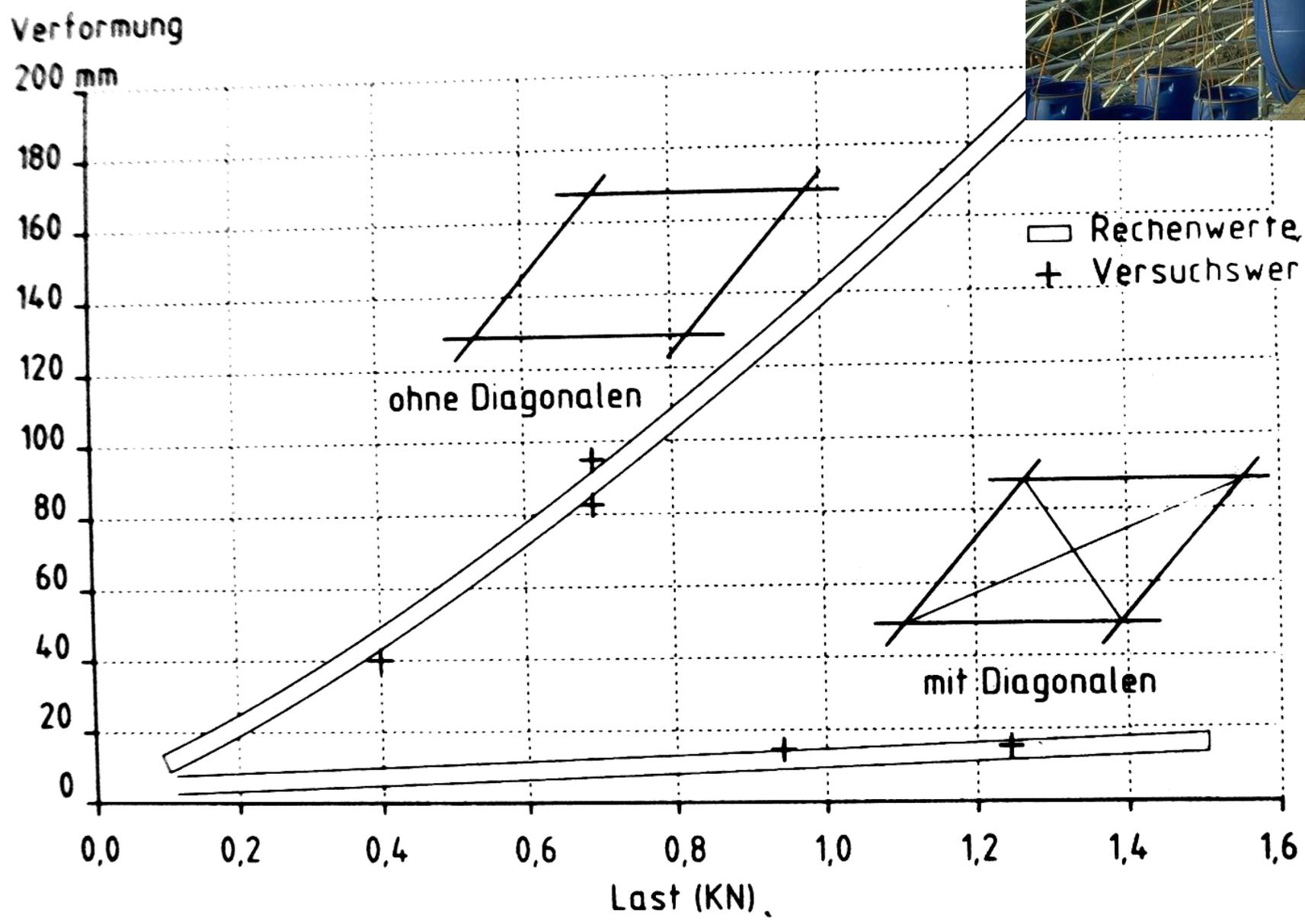


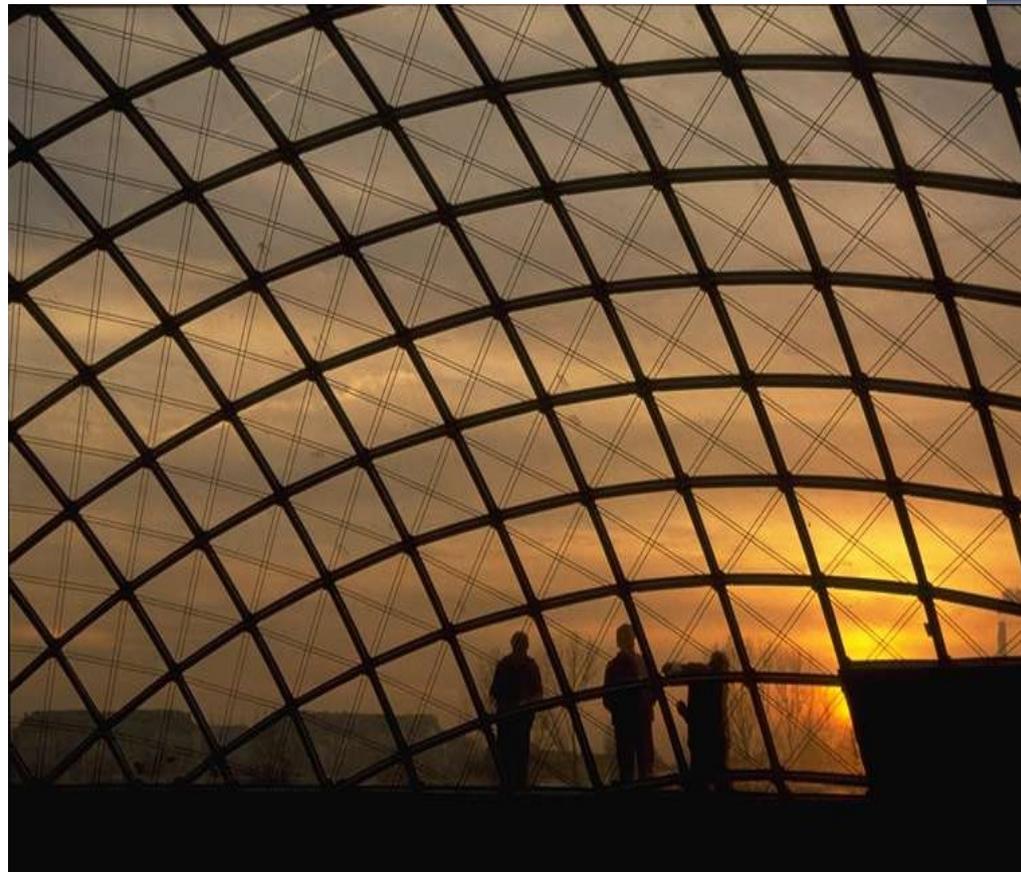
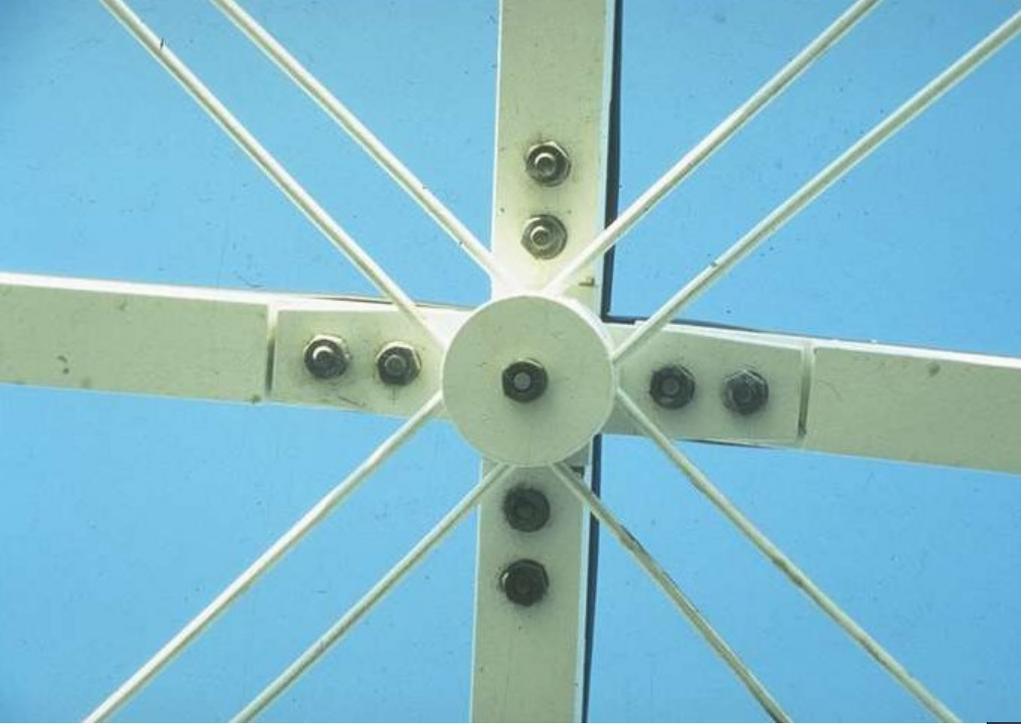


Netzkuppel  
Maschenwinkel  $\beta$

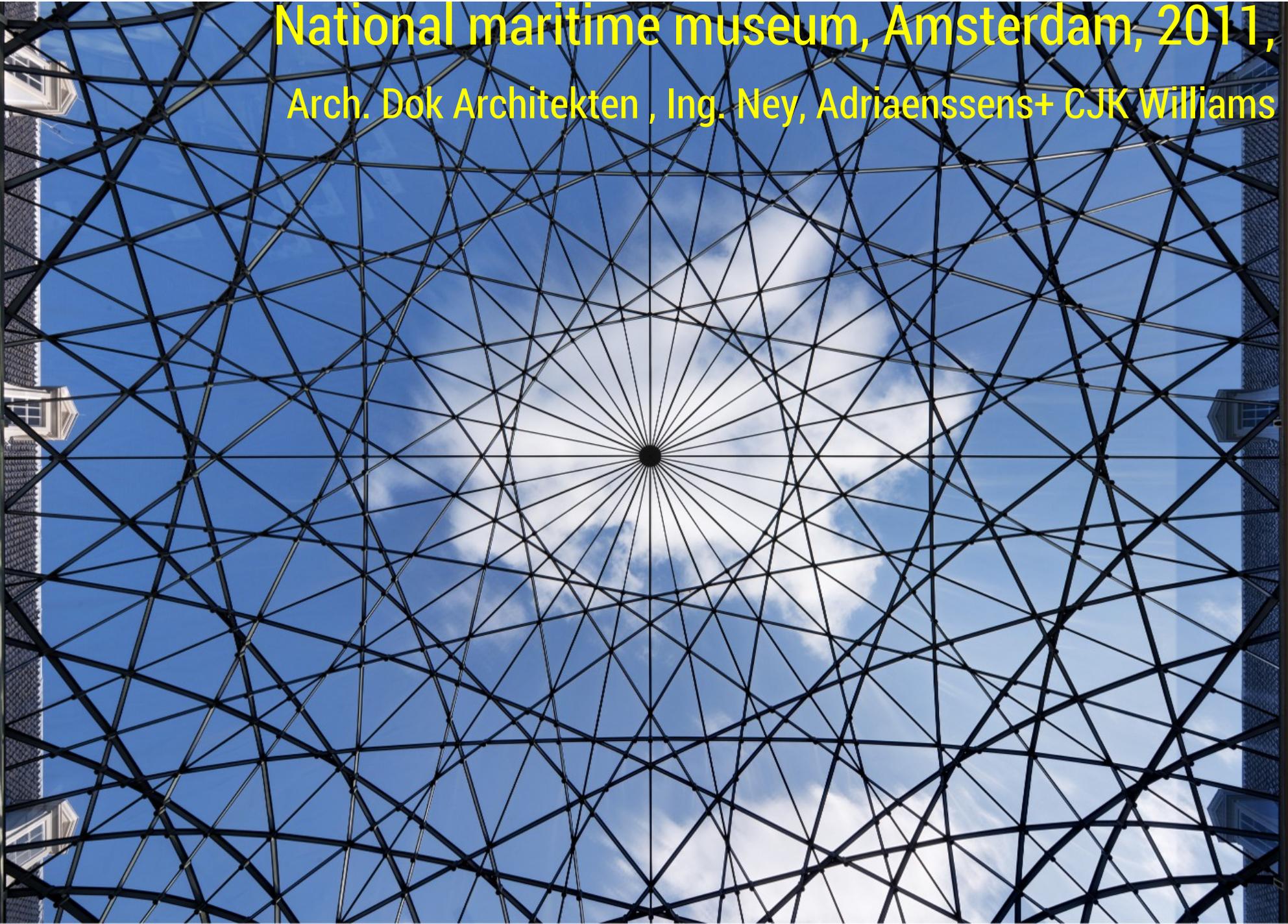


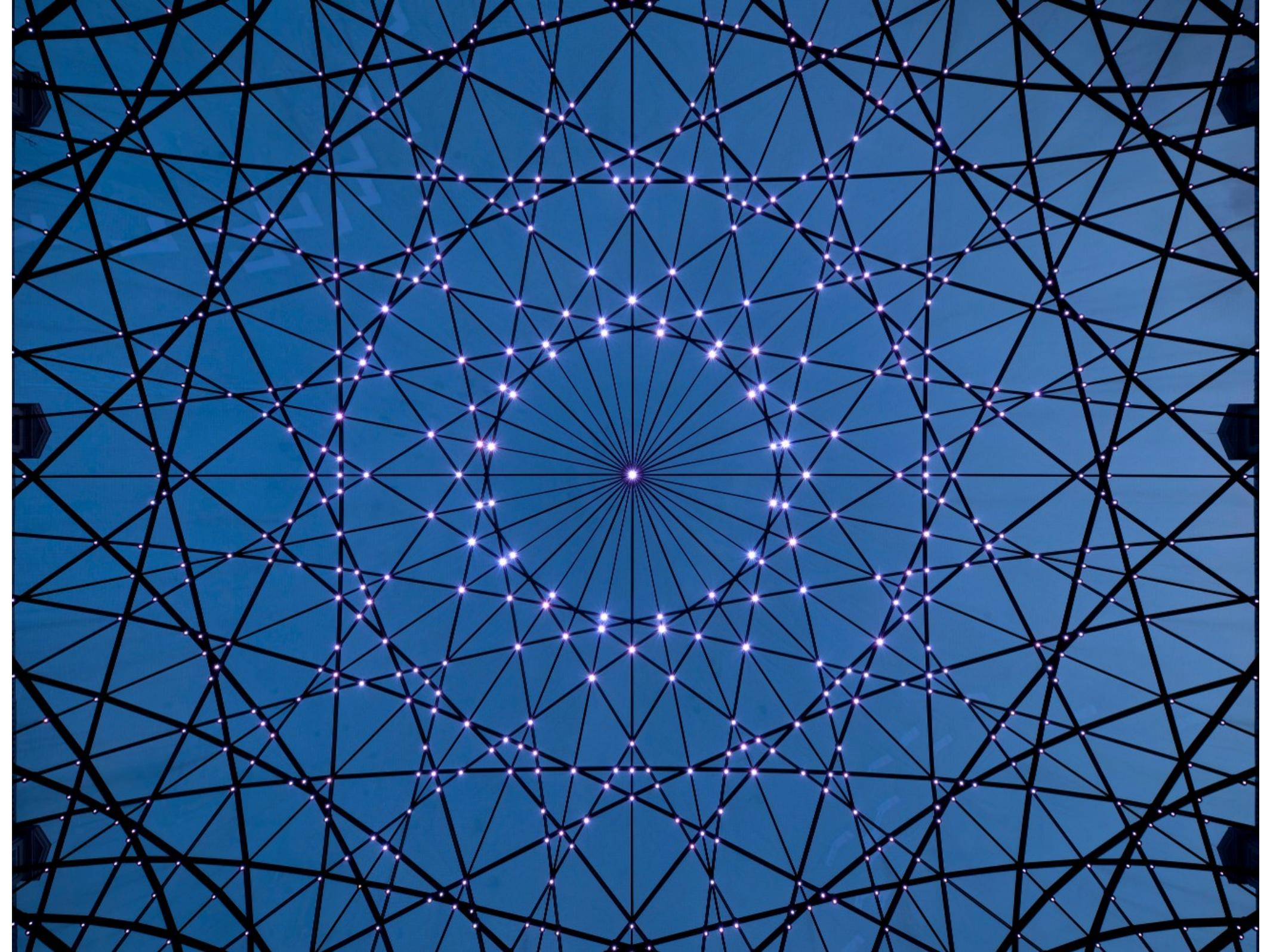
# Importance du contreventement.

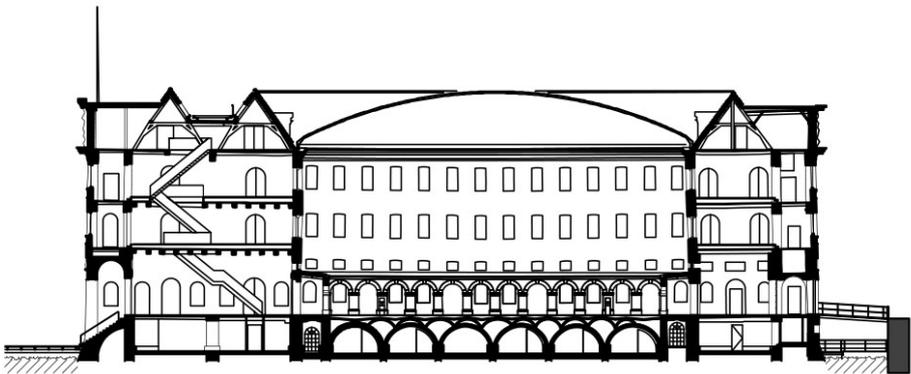
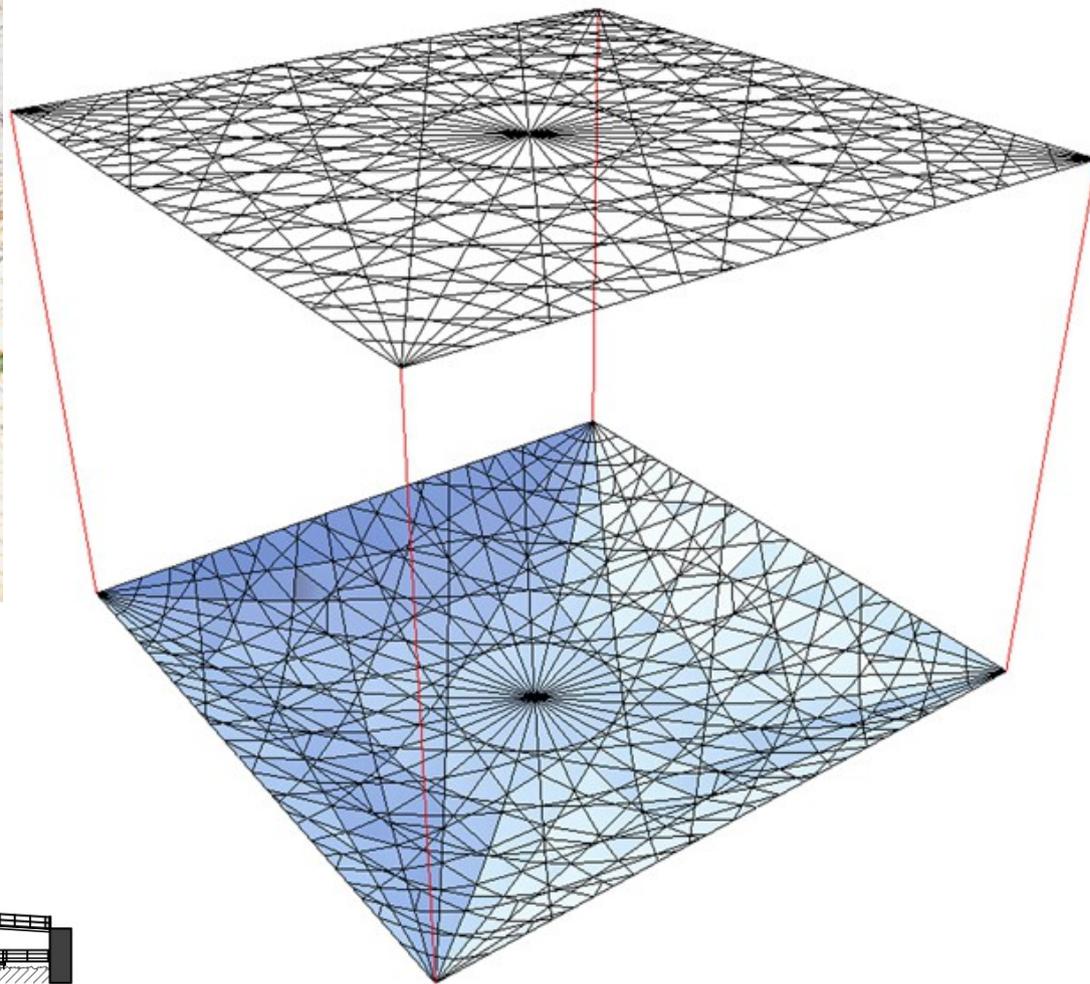




National maritime museum, Amsterdam, 2011,  
Arch. Dok Architekten , Ing. Ney, Adriaenssens+ CJK Williams







Doorsnede B-B



# Principes de génération de la géométrie

---

## Surfaces géométriquement contraintes : exemples...

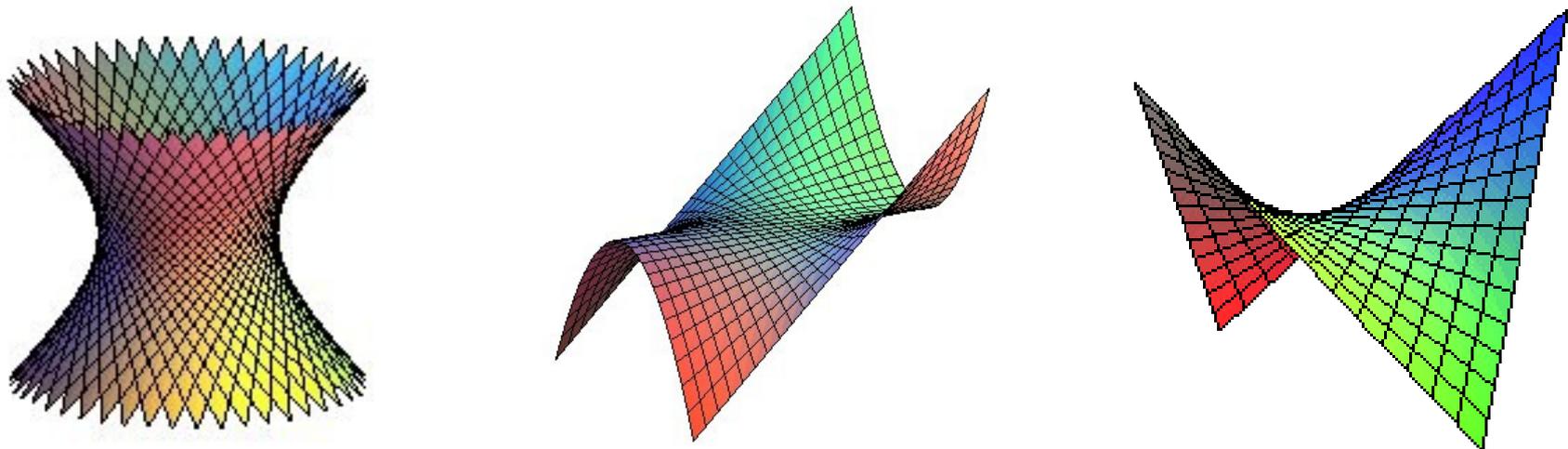
- Surfaces réglées
- Surfaces par rotation
- Surfaces par translation
- Objets libres ou non-standard

## Surfaces mécaniquement contraintes

- Systèmes tendues, comprimées ou fléchis

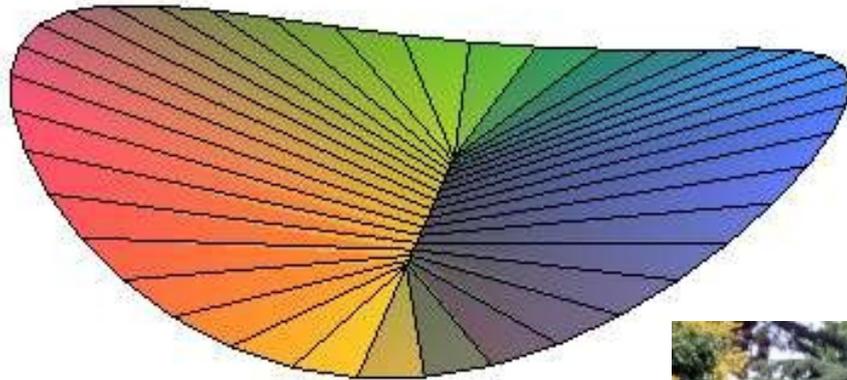
---

Principes de génération de la géométrie 1  
Surfaces géométriquement contraintes  
Surfaces réglées à double courbure:



# Surface d'Hector Guimard

Réunion des points suivants:

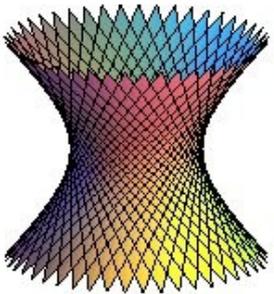
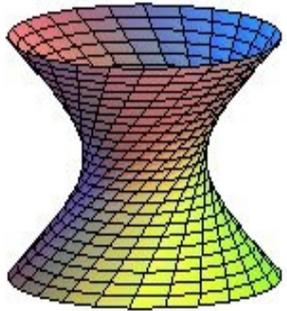
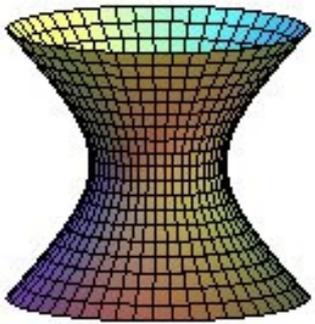


$$M(u) \begin{Bmatrix} a \cos u \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad N(u) \begin{Bmatrix} b \cos u \\ b \sin u \\ c \sin^2 u \end{Bmatrix}$$

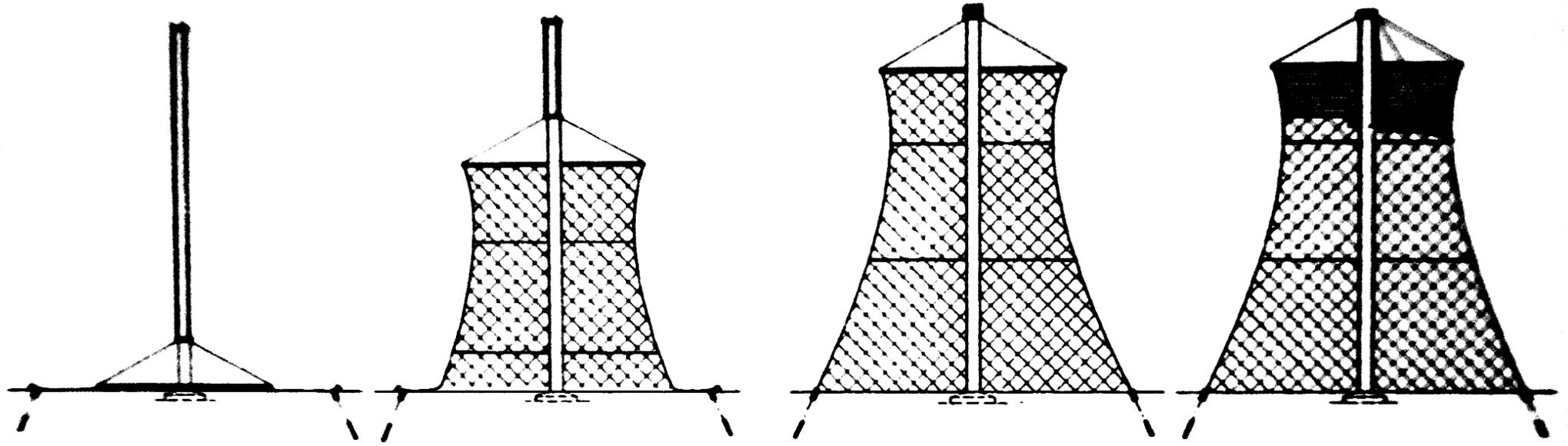


# Hyperboloïde de révolution

Aéroréfrigérant de la centrale nucléaire de Schmehausen, 1974,  
ing. Schlaich & Leonhardt.

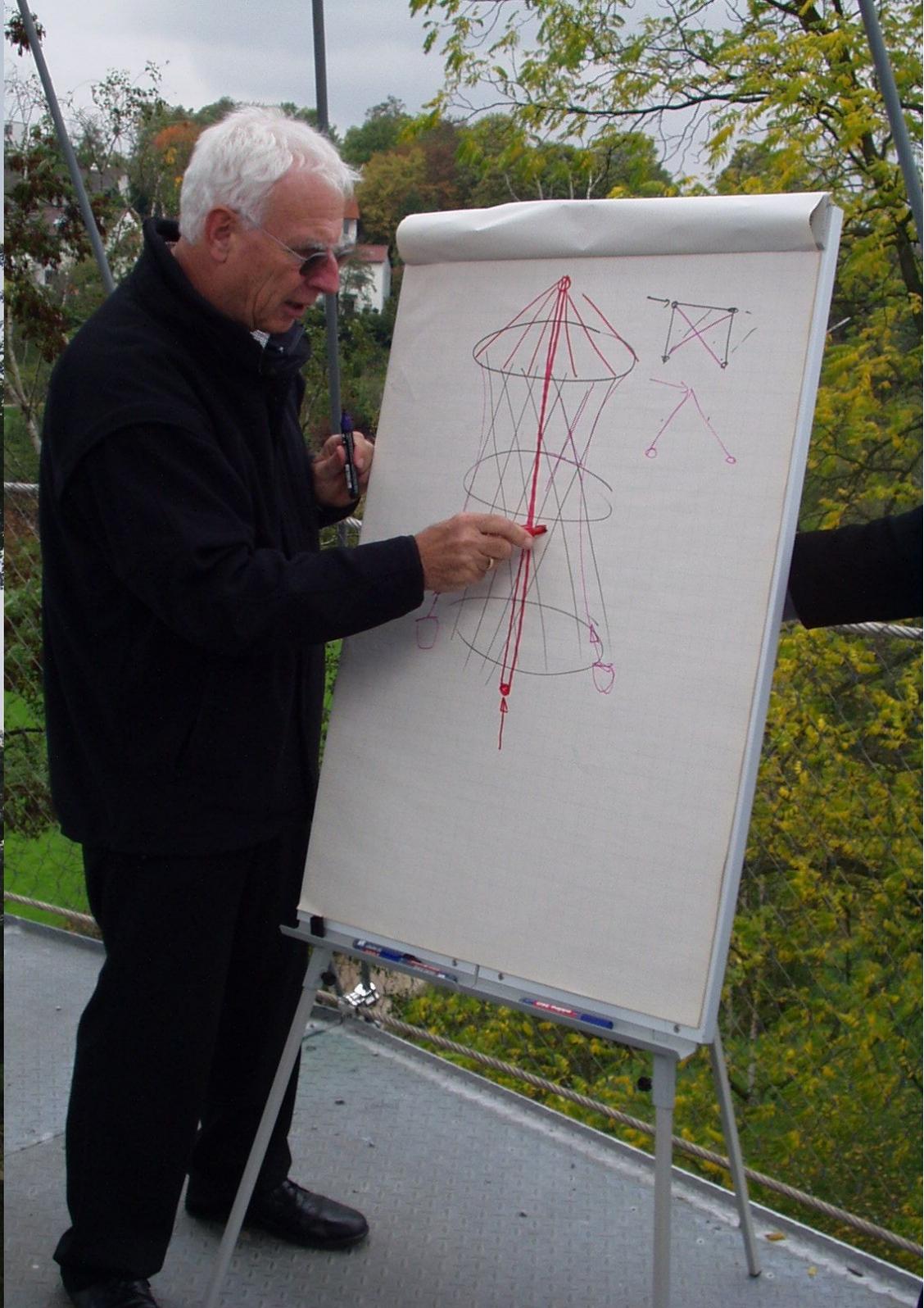


# Méthode de montage



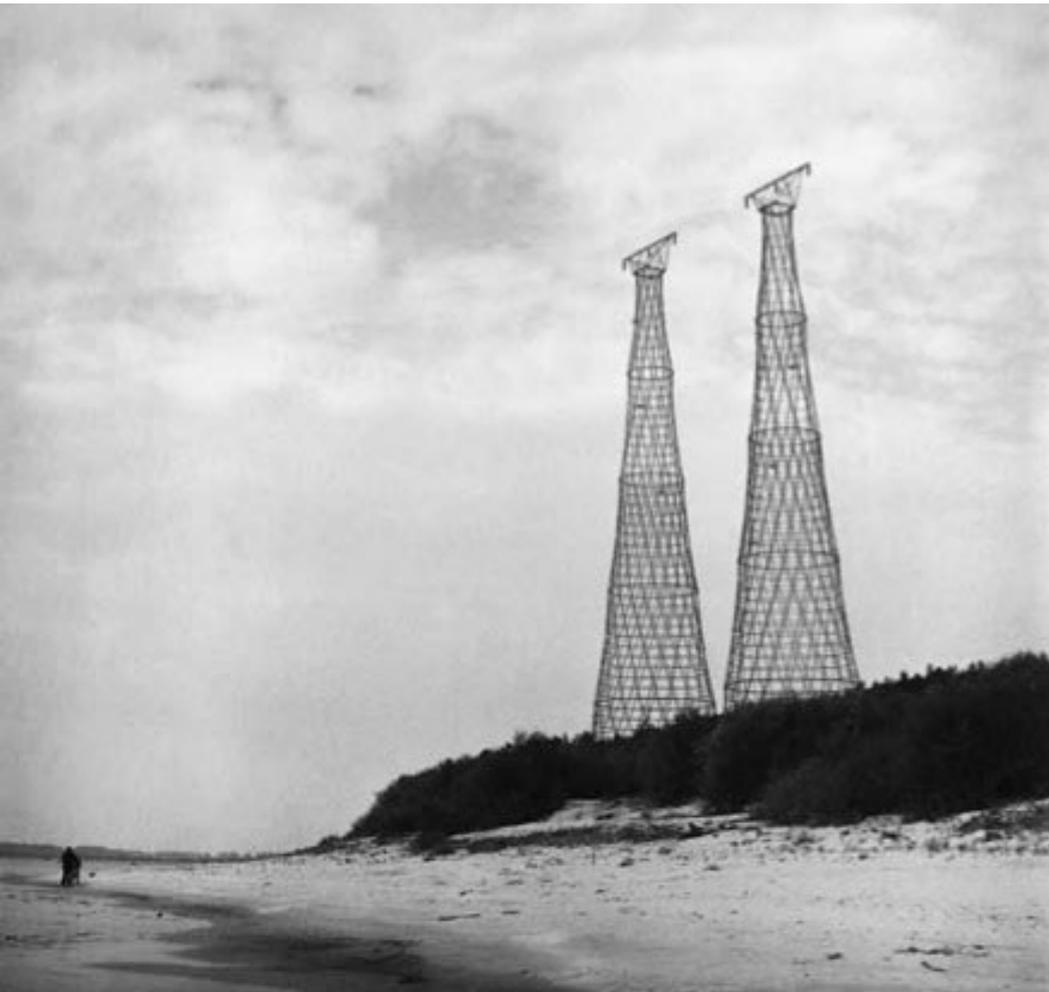


Tour de Killesberg, Stuttgart,  
2000, ing. SBP.



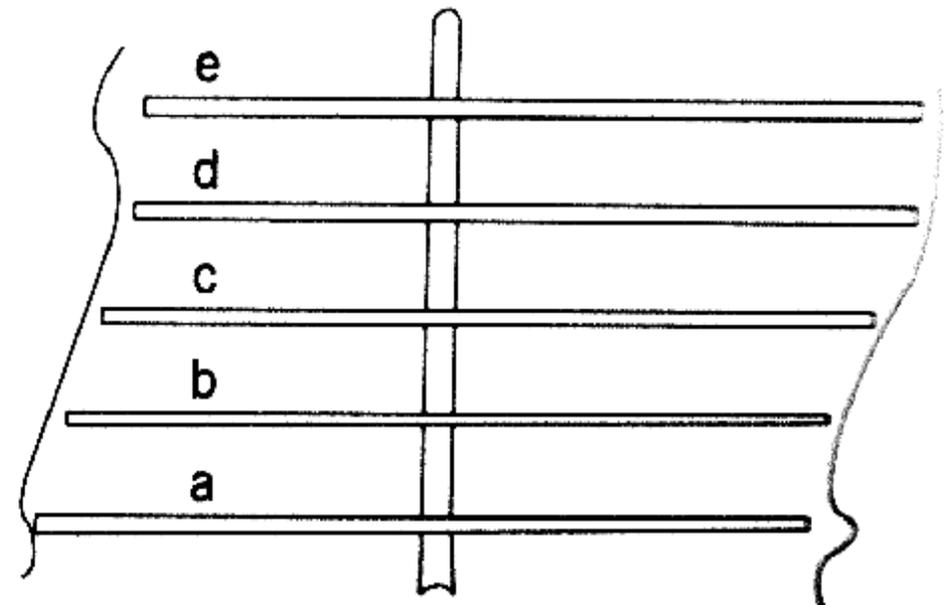
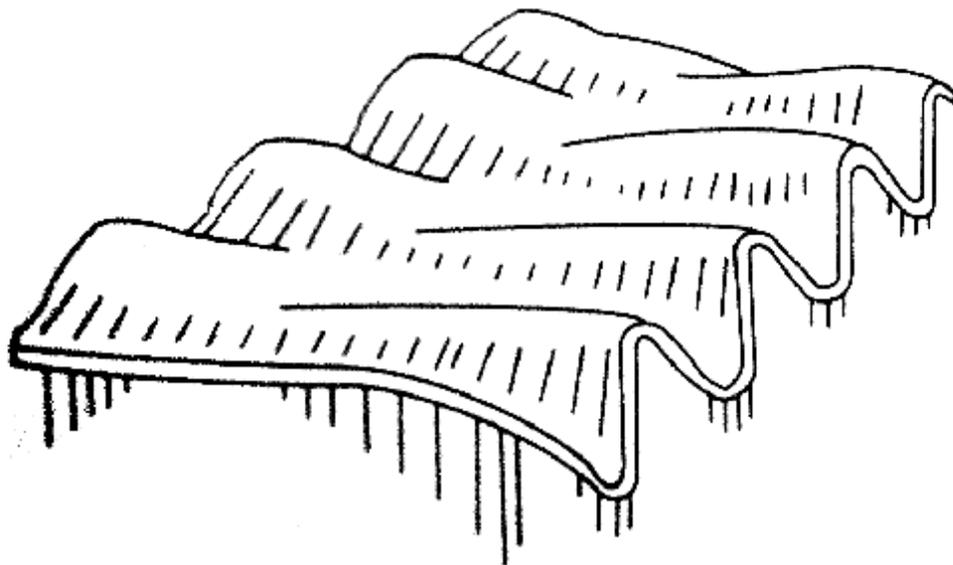
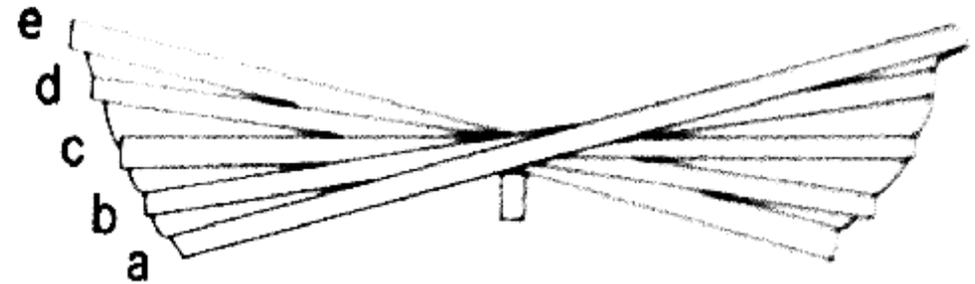
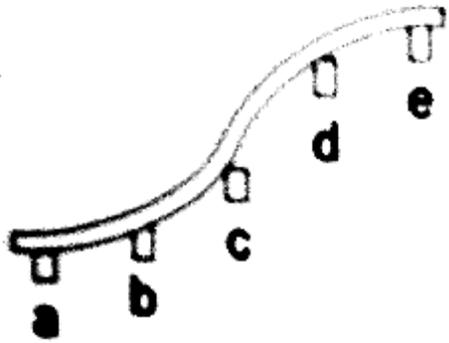
# Pylônes électriques

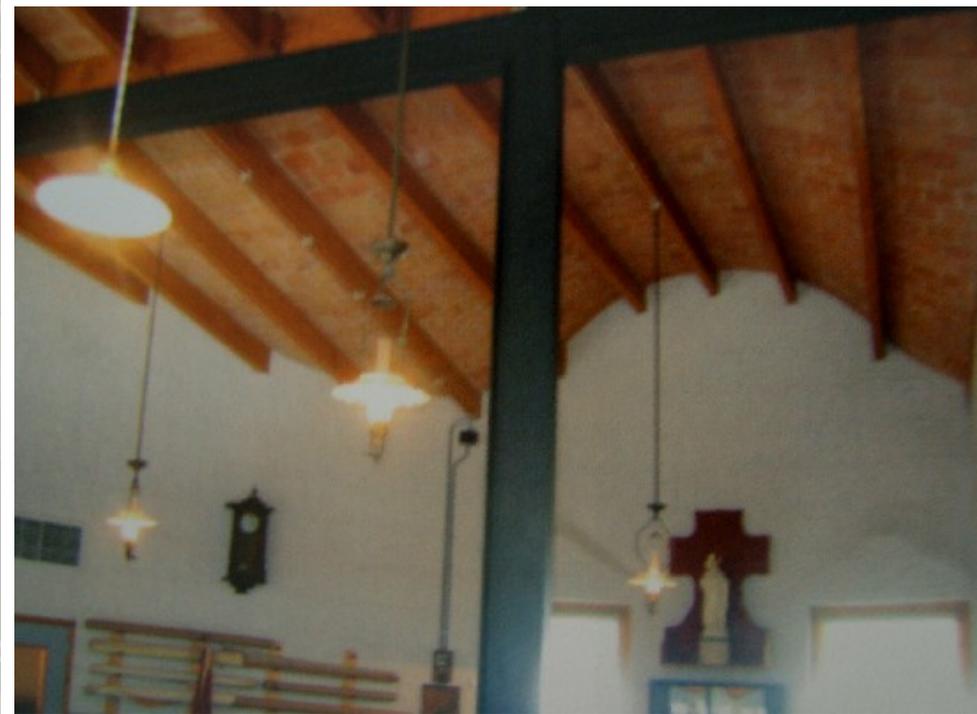
Vladimir Choukhov, 1922  
(hauteur maximale 160 m)



# Conoïdes

École de la Sagrada Família, A. Gaudi, 1909

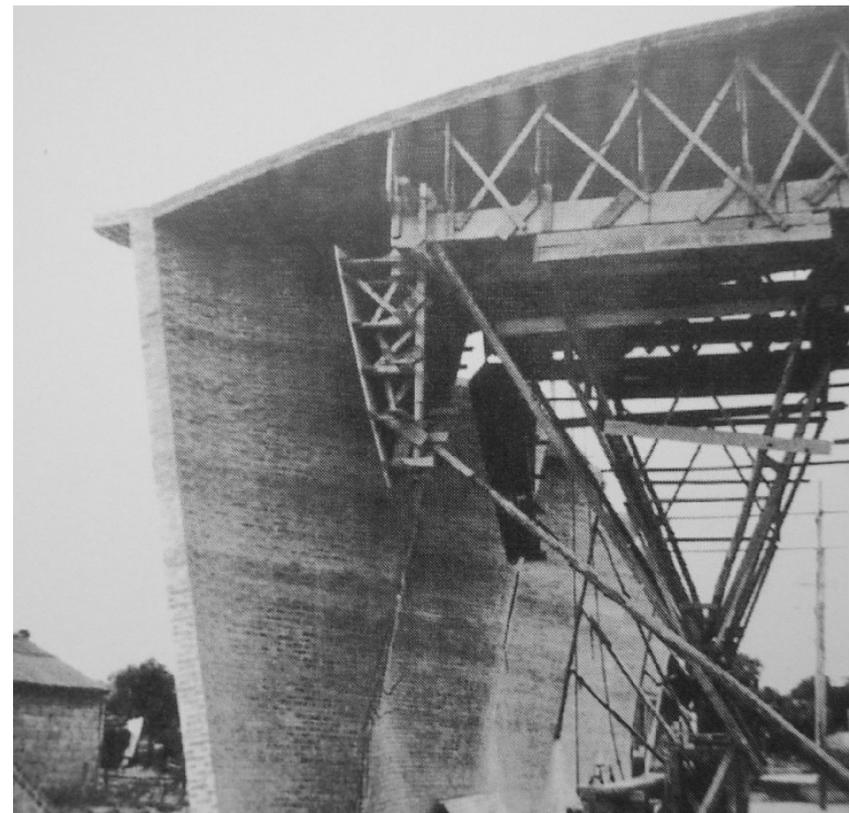
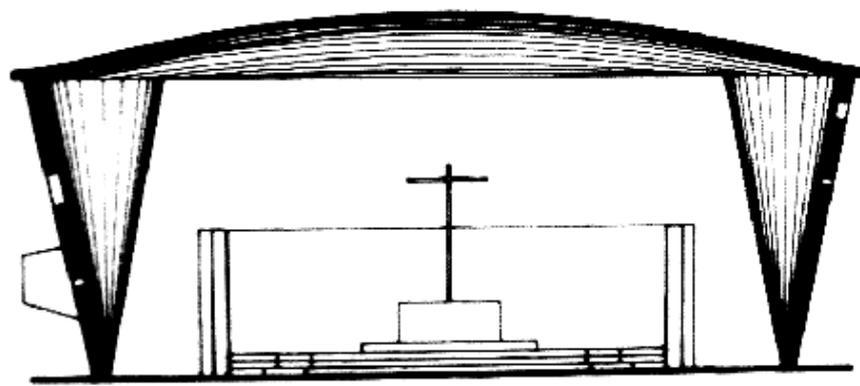
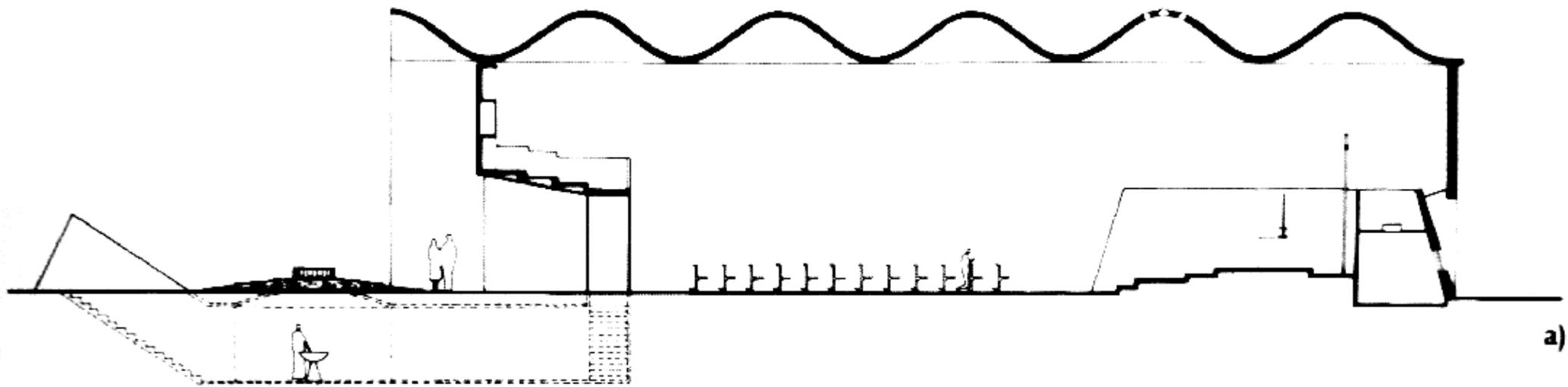




# Église du Christ ouvrier, E. Dieste, 1958

---

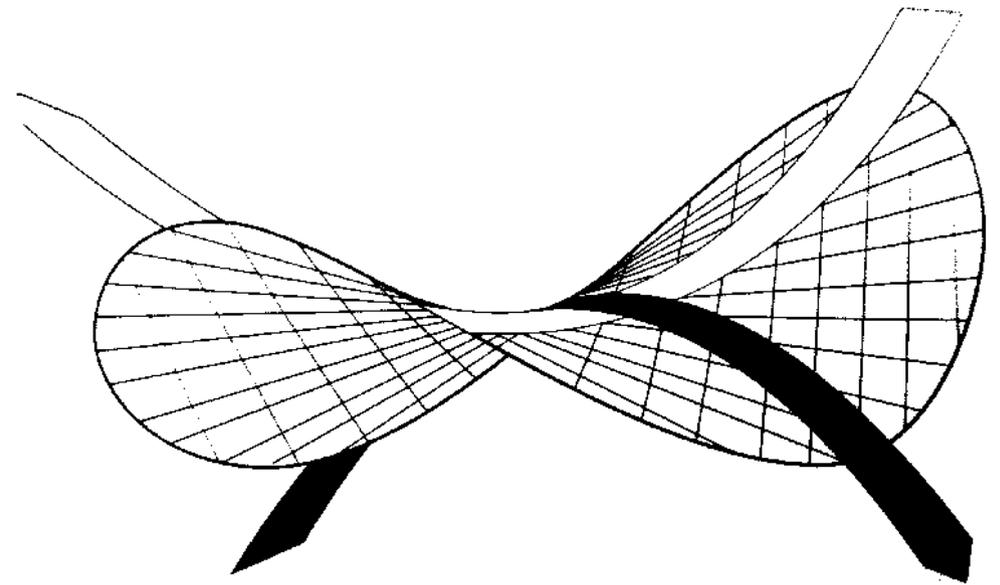
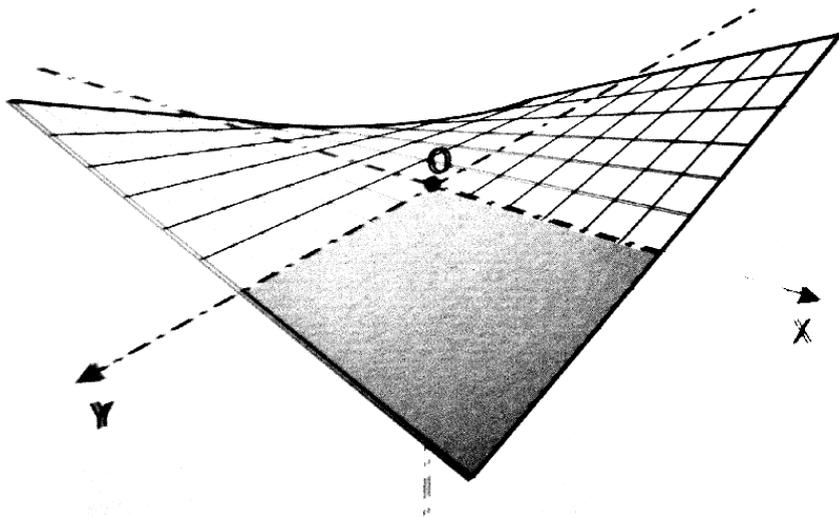
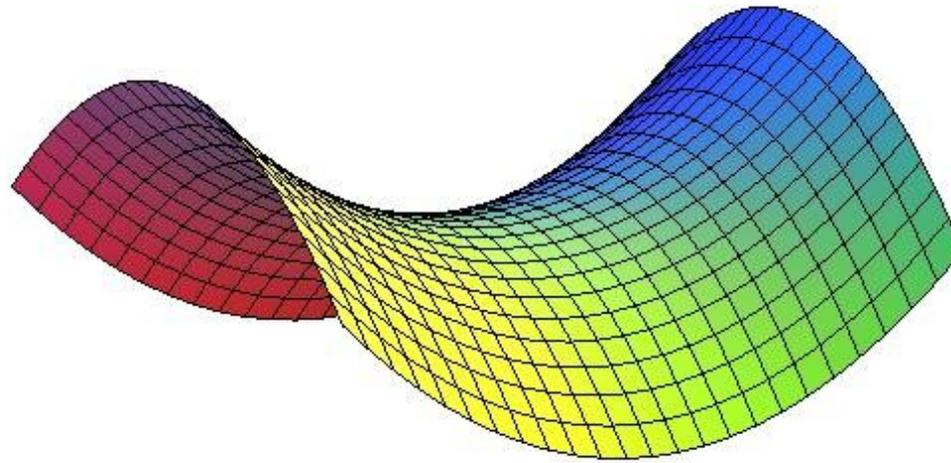
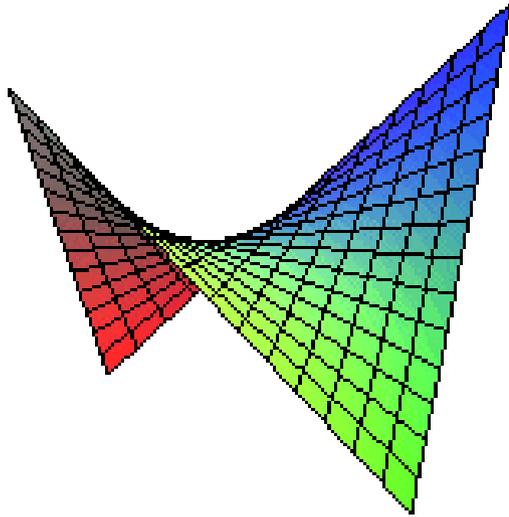






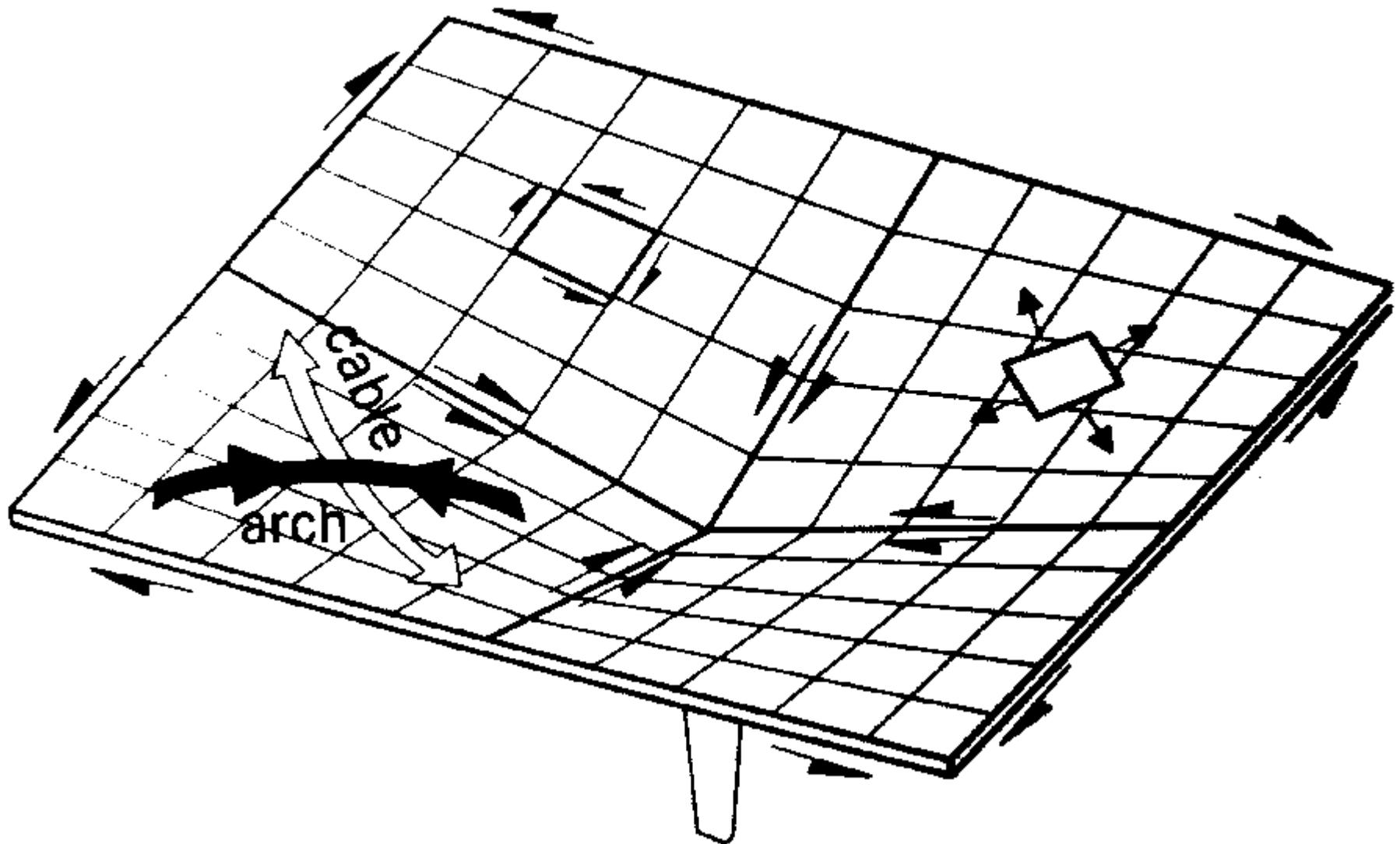
# Paraboloïde hyperbolique ou PH

---

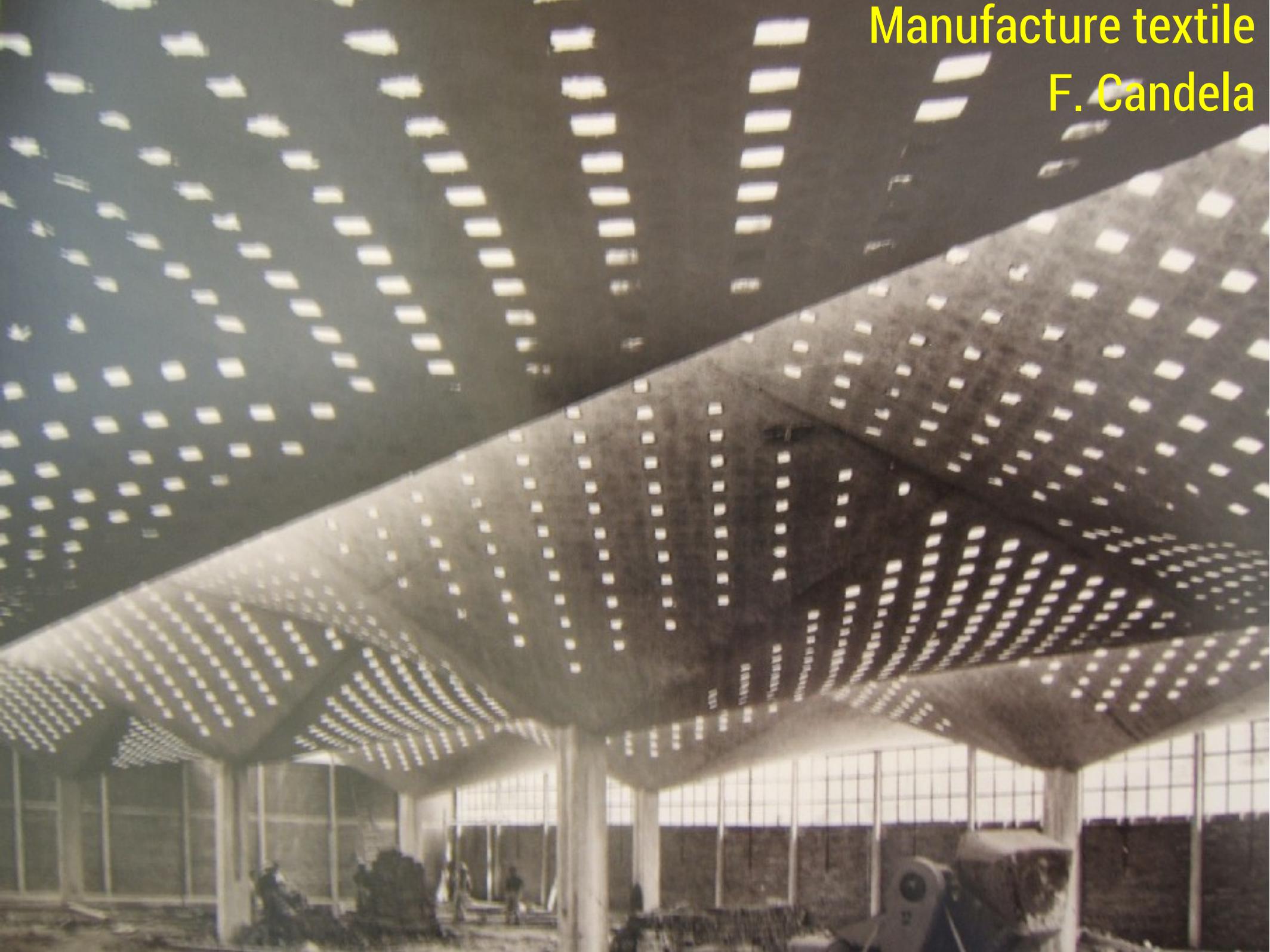


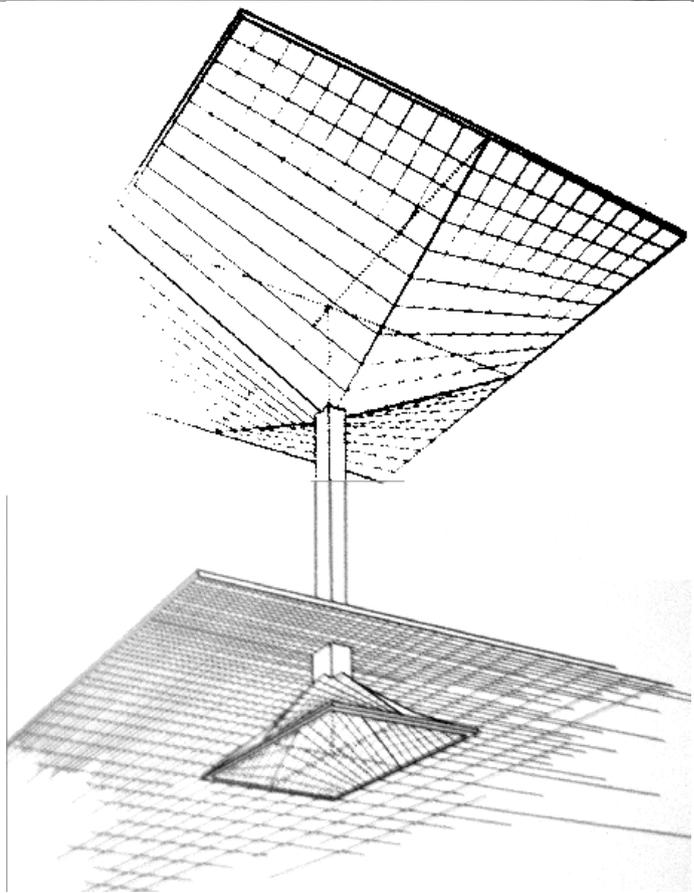
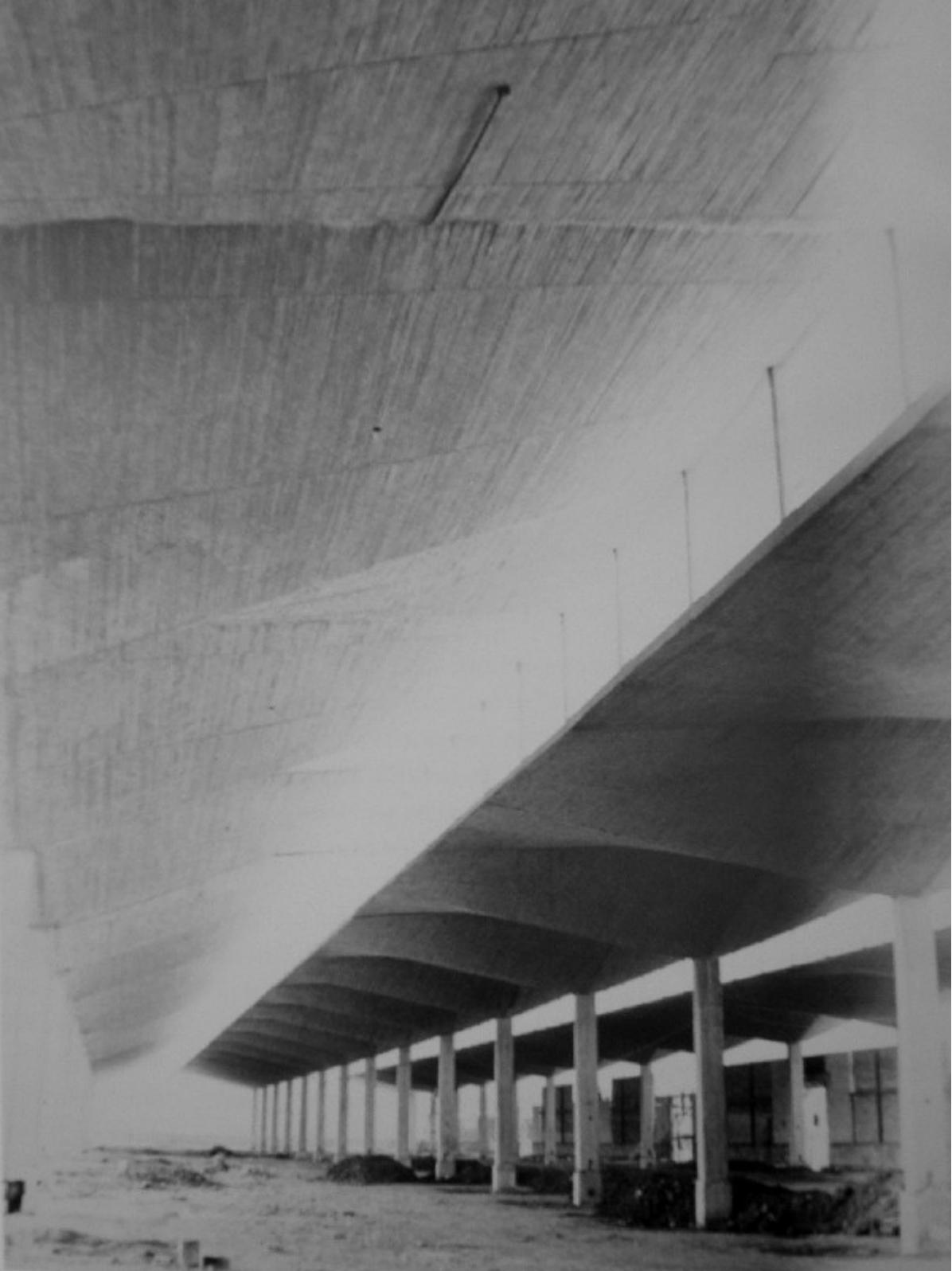
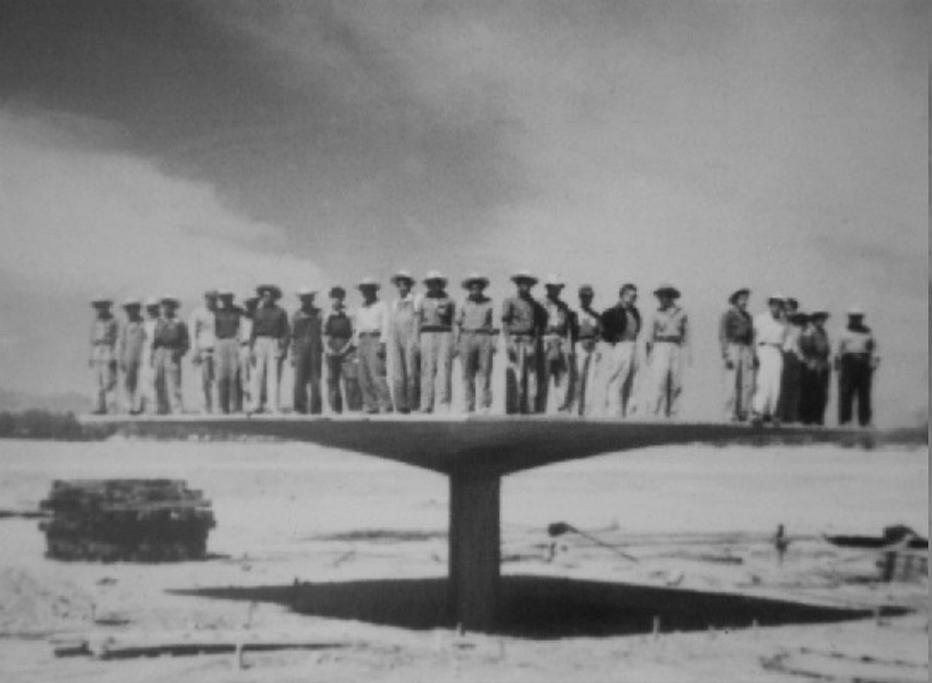
# Les parapluies de Félix Candela.

---



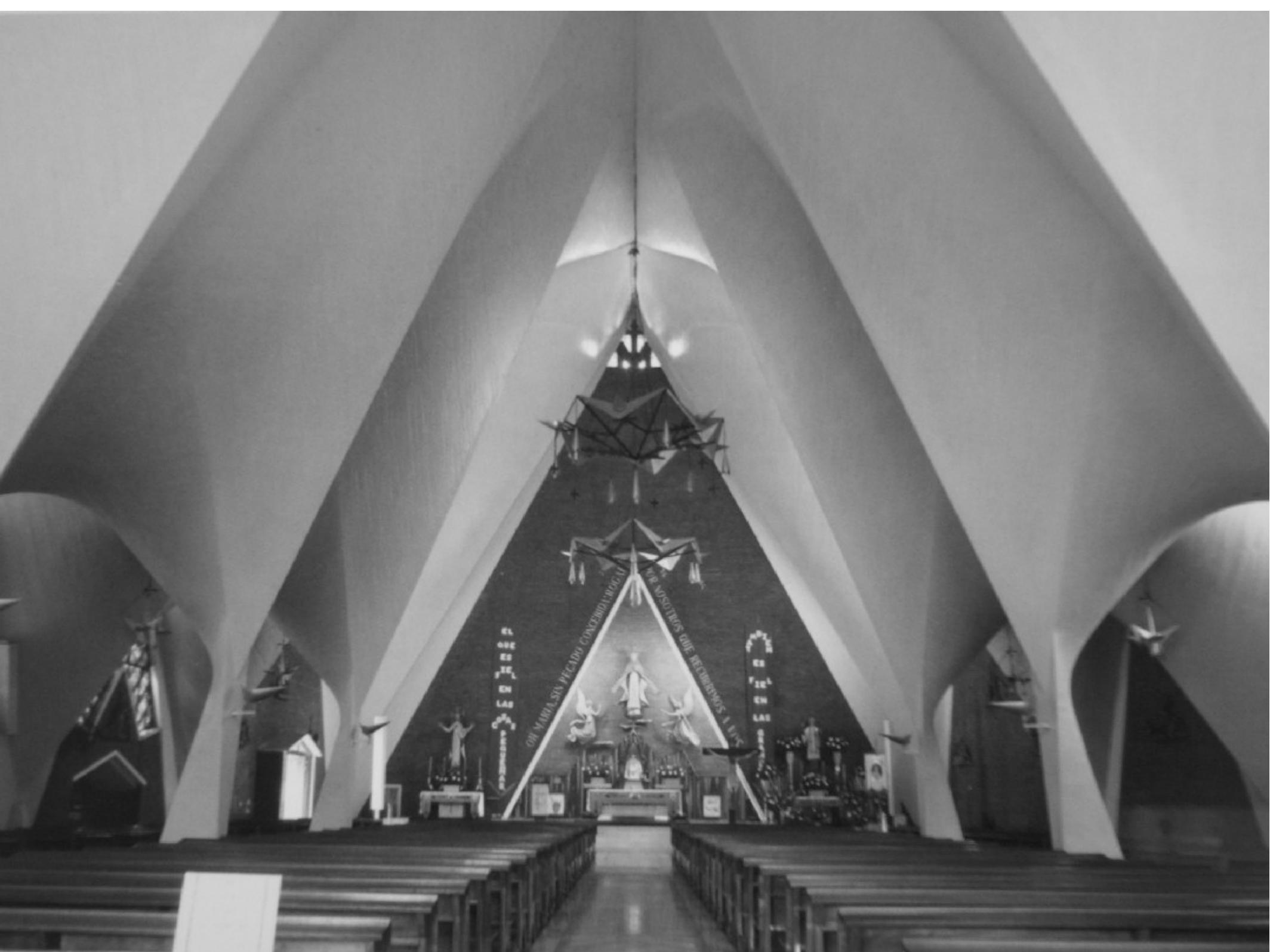
Manufacture textile  
F. Candela

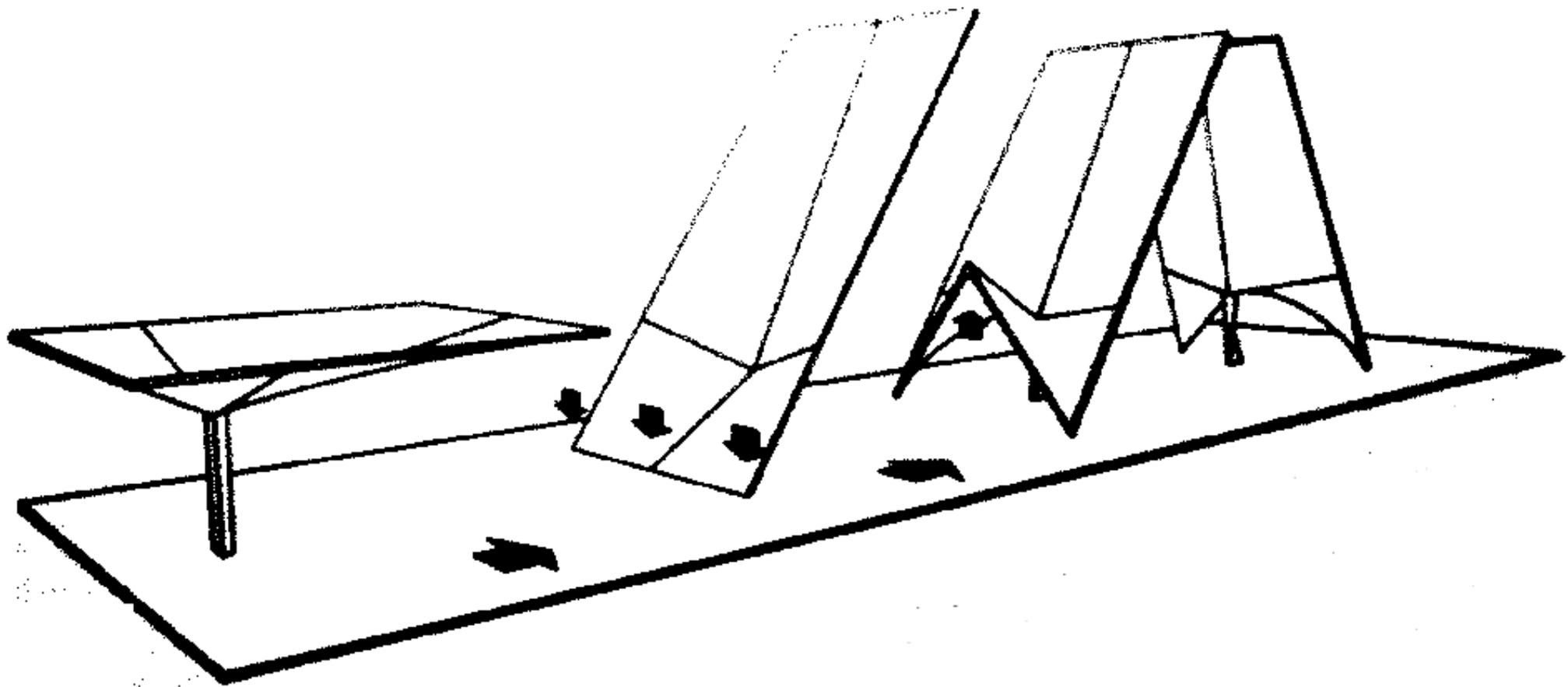






Église de la vierge miraculeuse, 1955, F. Candela





# Alsterschwimmbad, Hambourg, 1967

## Leonhardt & Schlaich

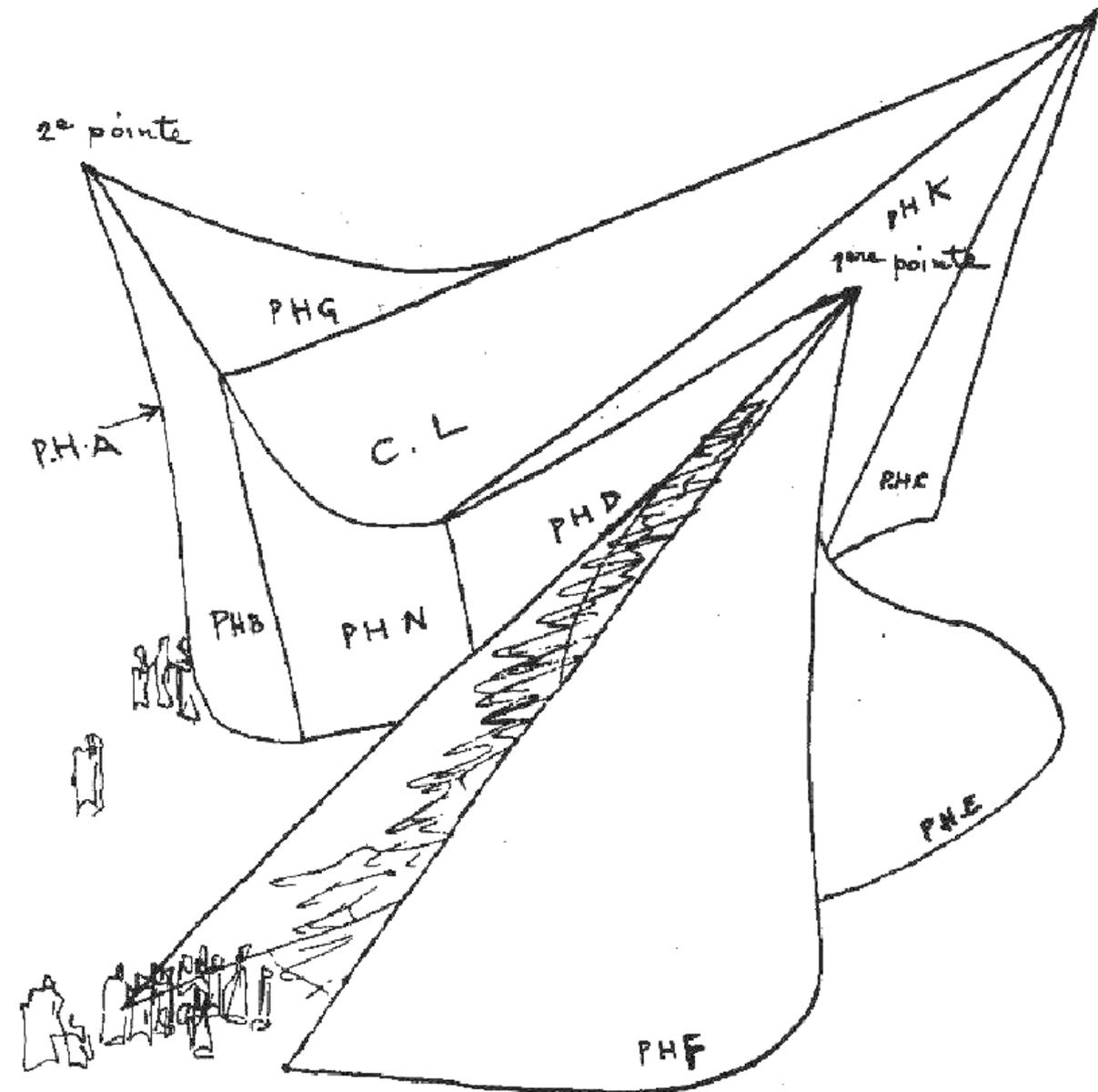
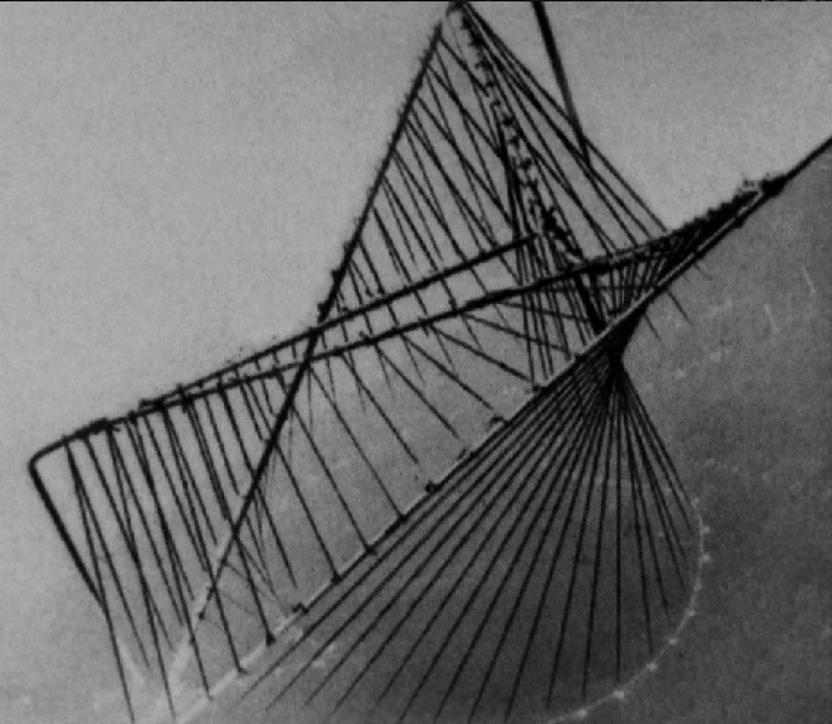
---



# Pavillon Philipps, Expo'58 Bruxelles

## I. Xenakis-Le Corbusier

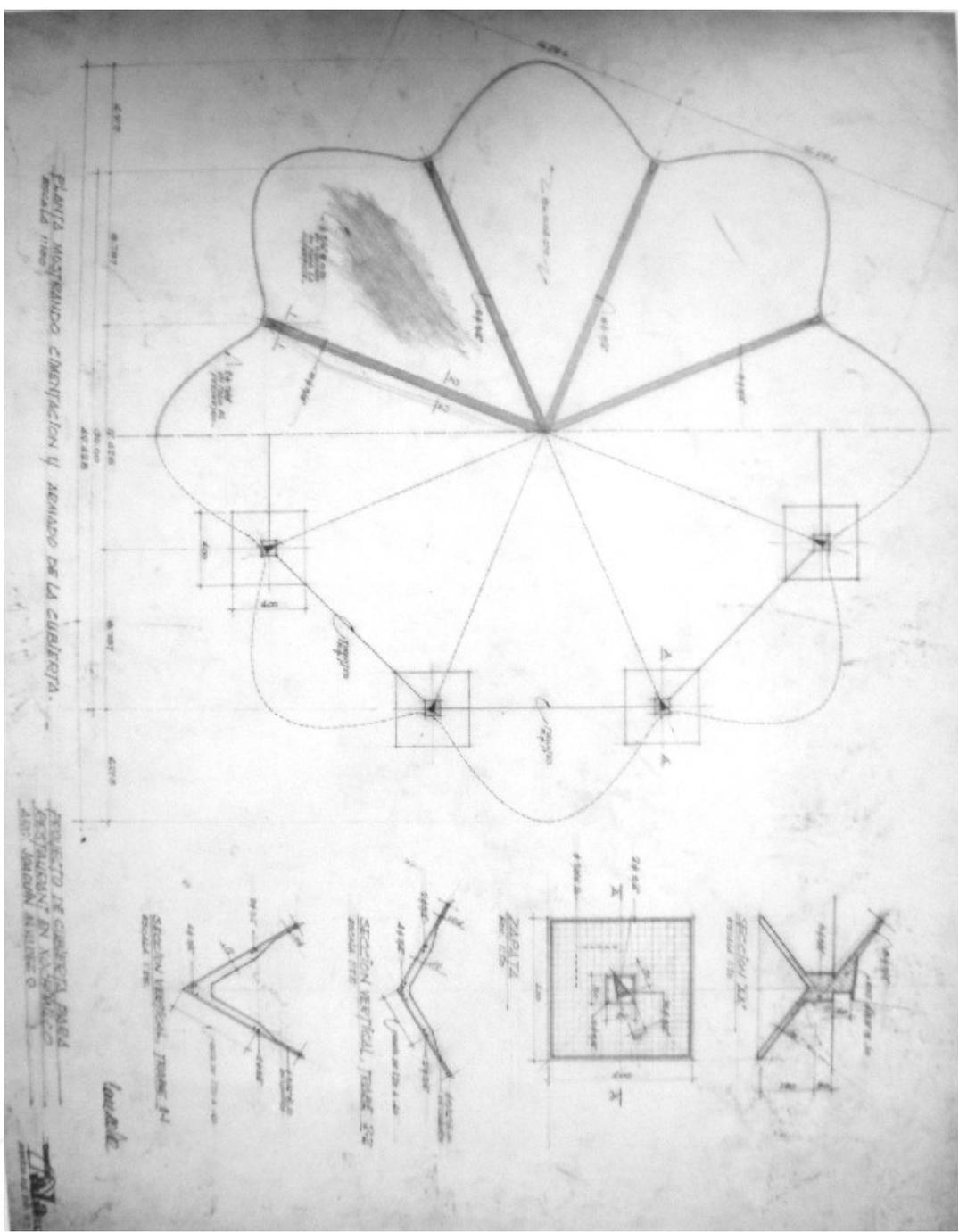
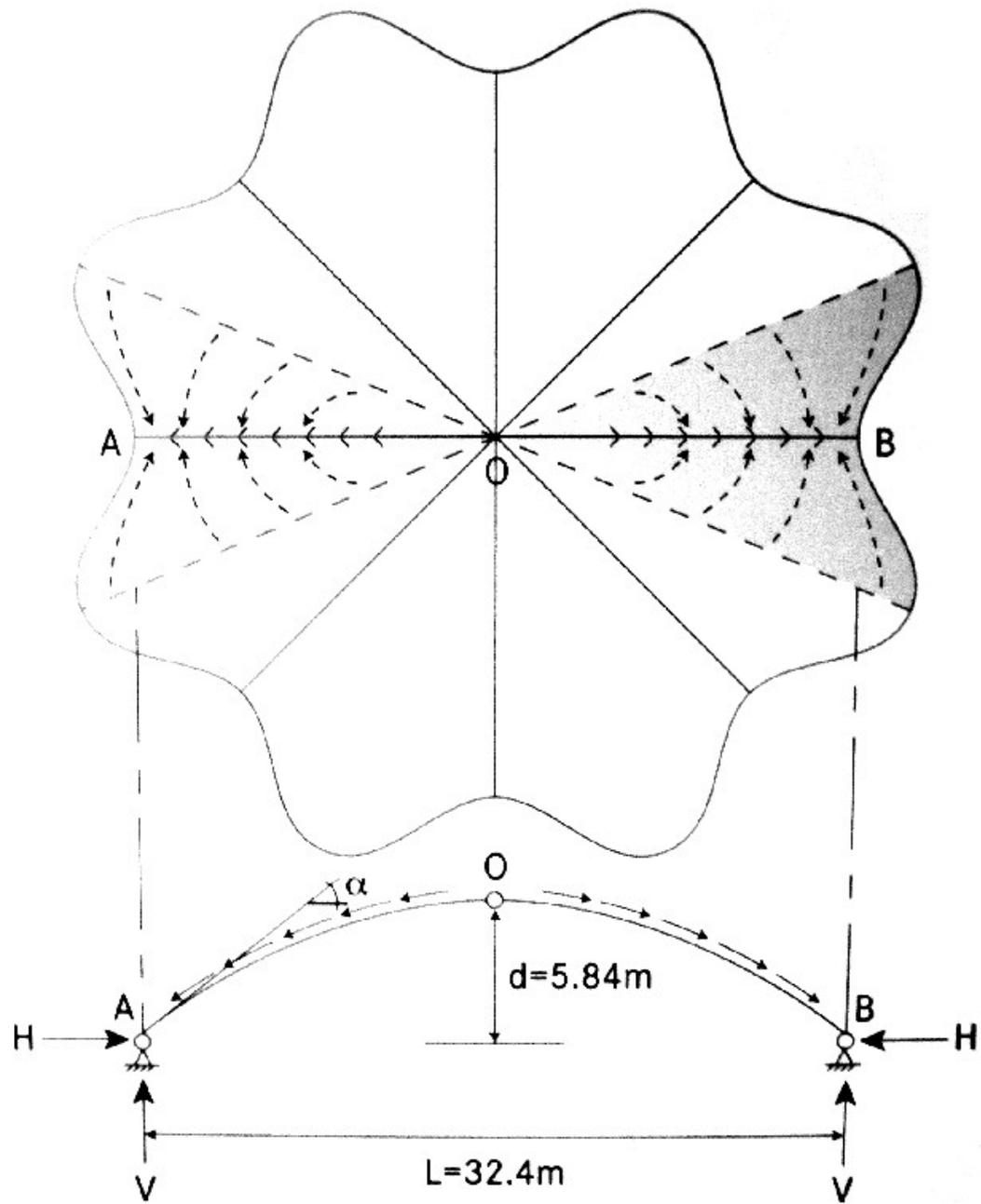
---



# Los Manantiales à Xochimilco, Candela, 1958





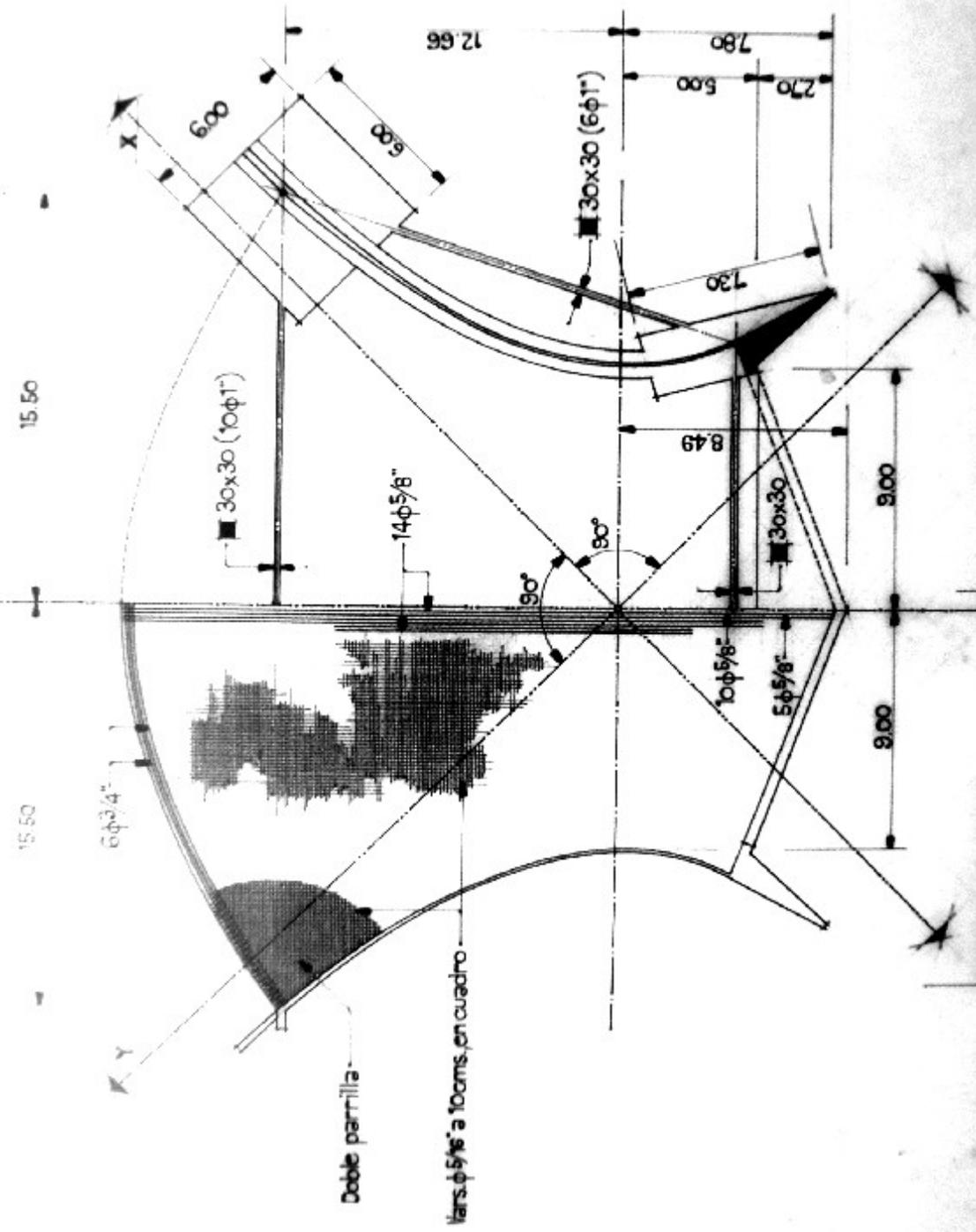
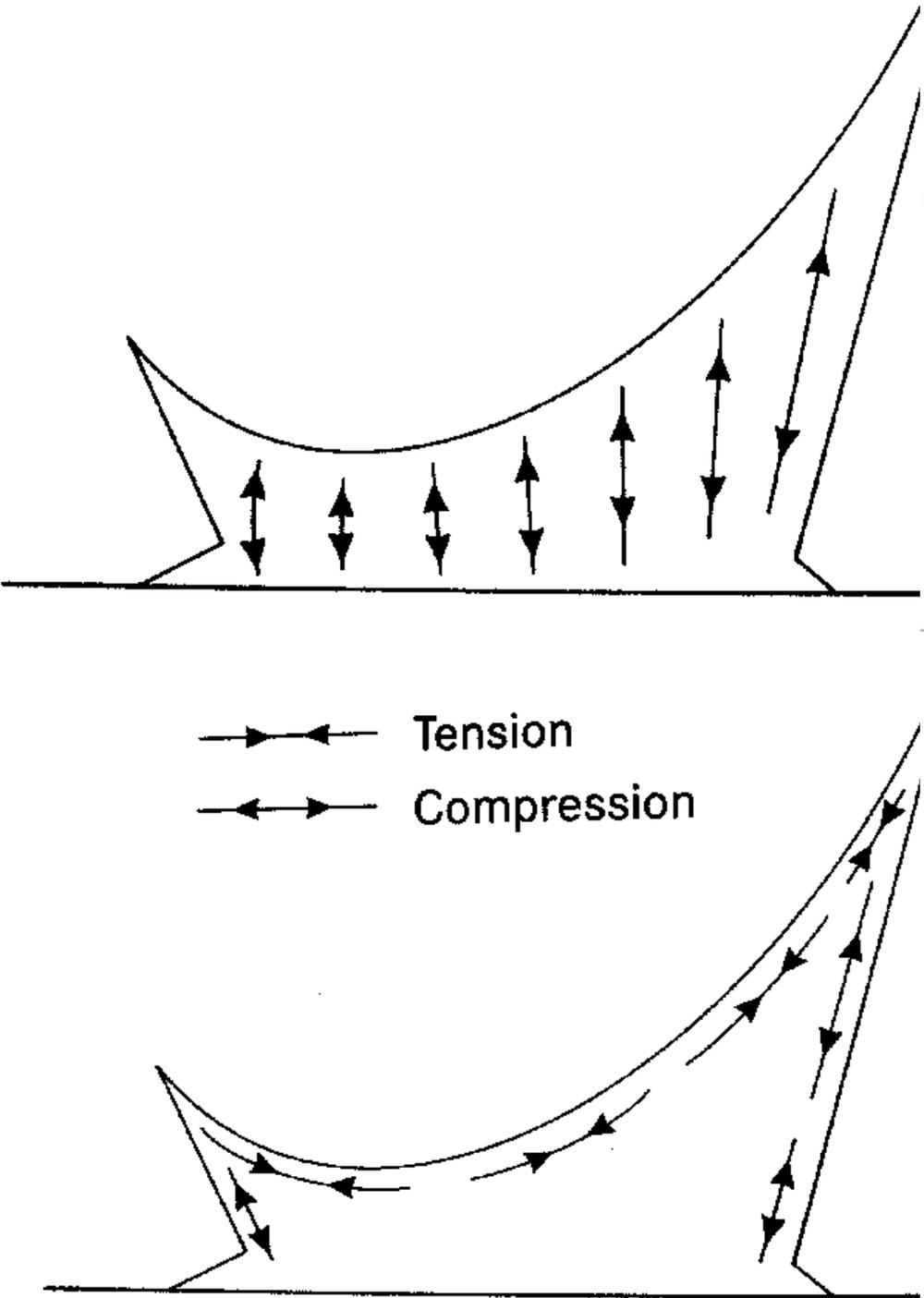




Chapelle Mirador el Palmira, F. Candela, 1959 Mexique



 Tension  
 Compression

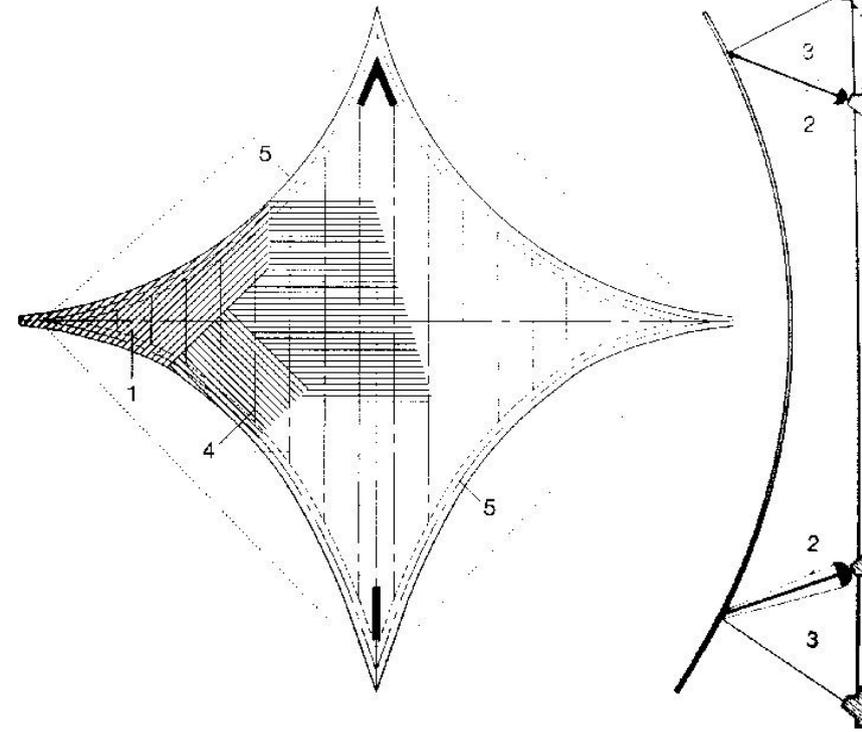




# Pavillon pour l'exposition horticole de Dortmund 1969

Architectes: Behnisch & Partners,  
Ingénieurs: Natterer & Scholz

Portée 65 m



# Pavillon de danse, Cologne, 1978-2002

---

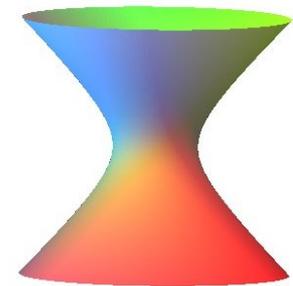
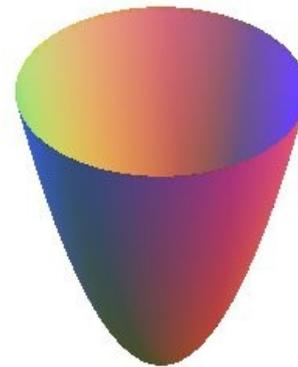
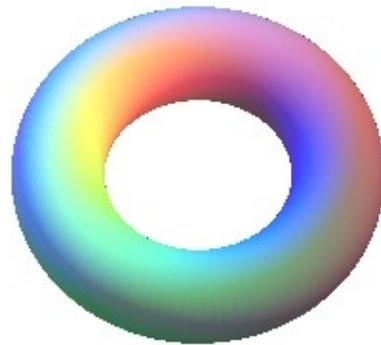
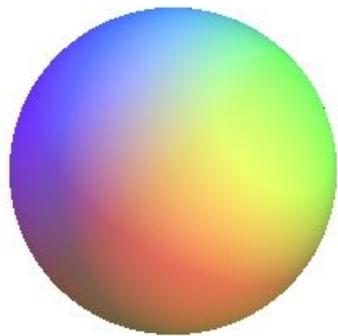


---

# Principes de génération de la géométrie 2

## Surfaces géométriquement contraintes

### Surfaces de révolution



# Piscine Saint Quentin en Yvelines, 1997

---

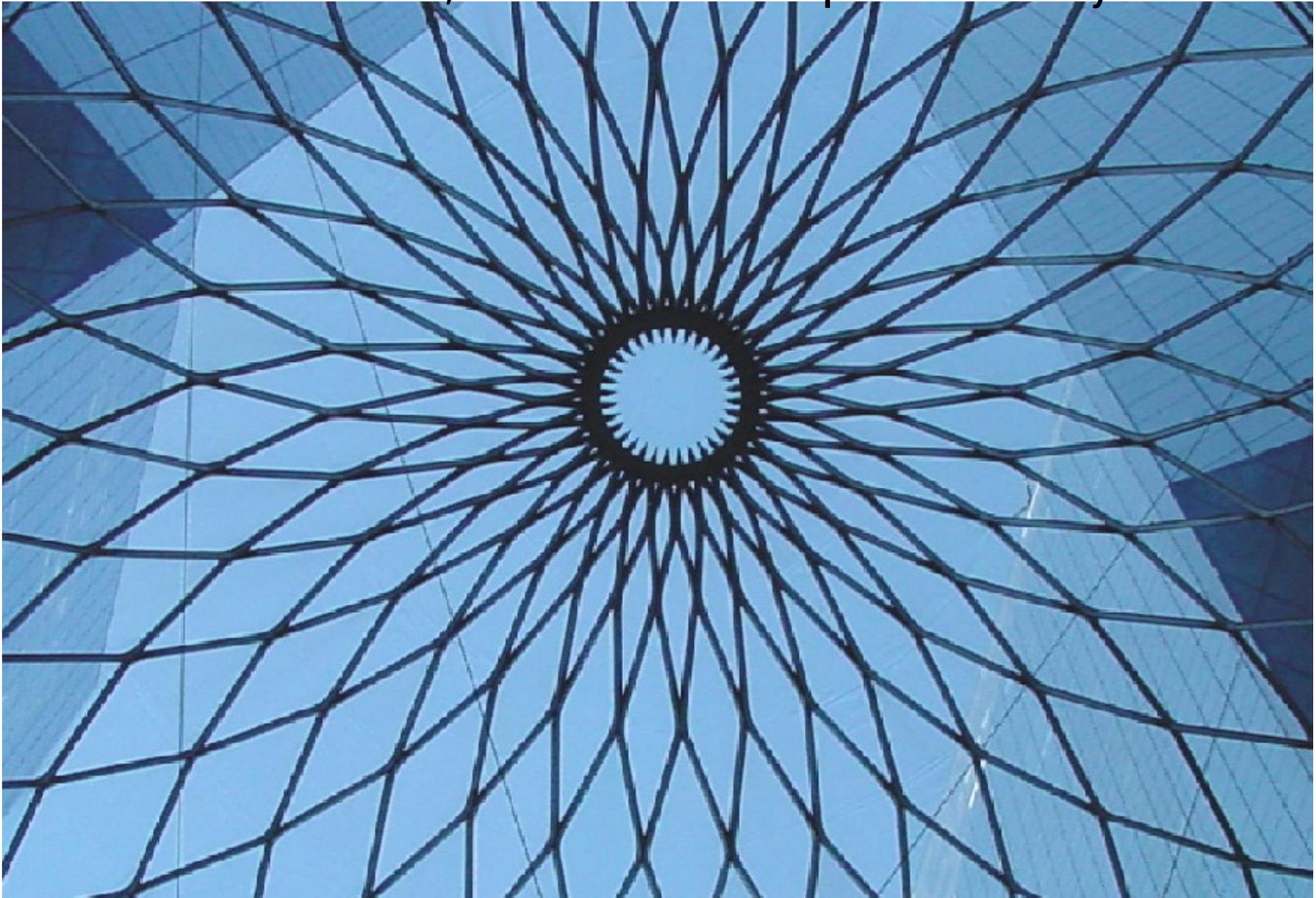


Arch.: M Carduner et ass. ; Ing.: Natterer, ICS Bois

Musée Maritime d'Osaka, 1997,  
Arch. Paul Andreu, Ing. Ove Arup

---

Courbes de Viviani, intersection d'une sphère et d'un cylindre



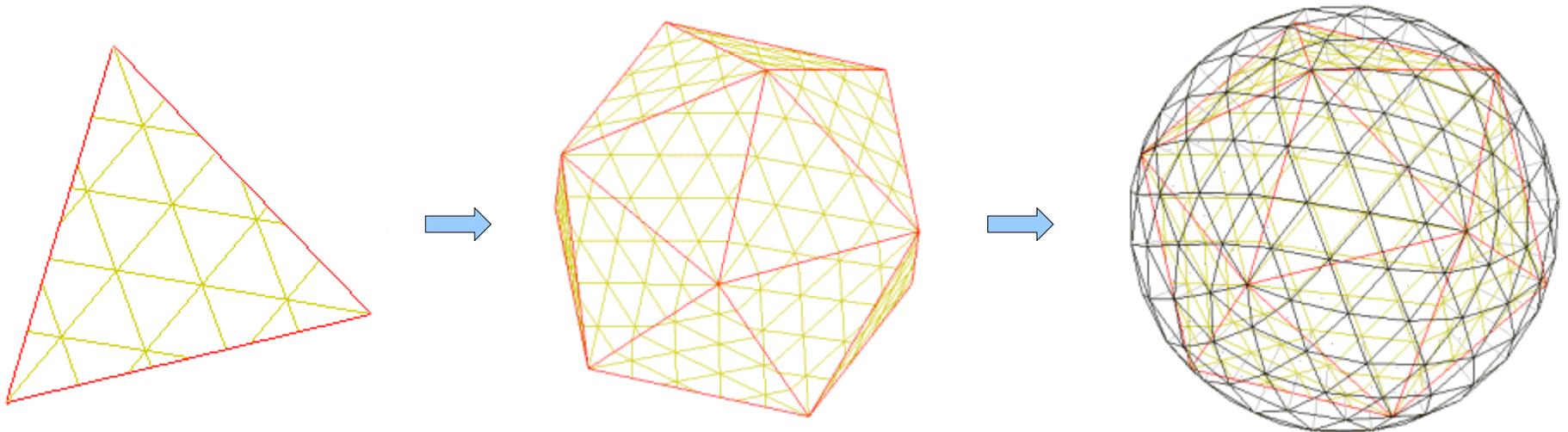


# Dômes géodésiques : l'apparence de la régularité

---

Premier dôme géodésique construit par Walter Bauersfeld, 1922 ;

Structures étudiées par l'architecte Richard Buckminster Fuller dans les années 1940 ainsi que par les biologistes M. Goldberg, D. Caspar, et A. Klug en 1962.



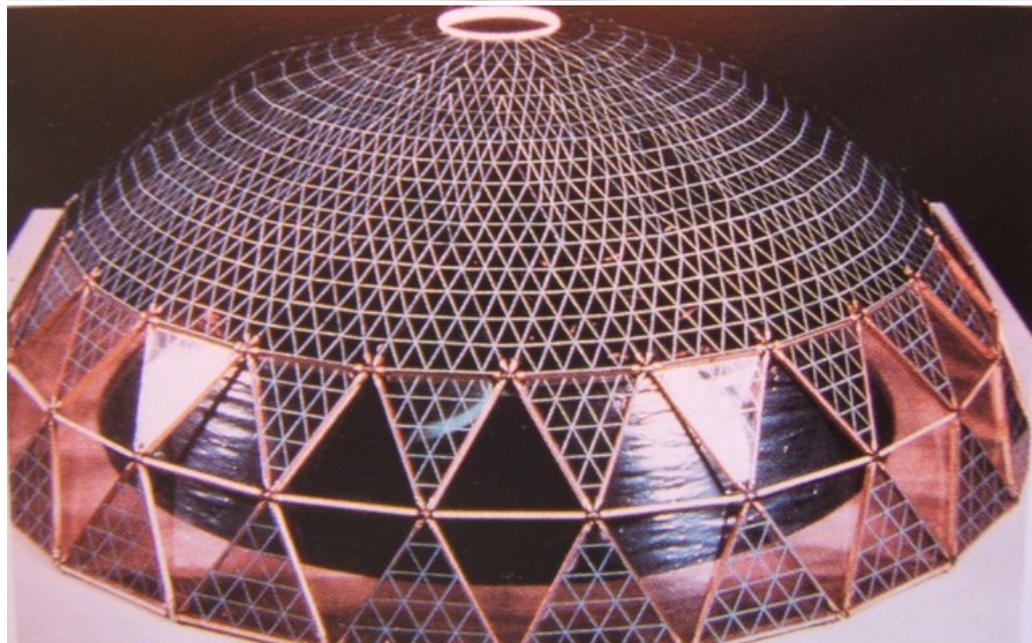
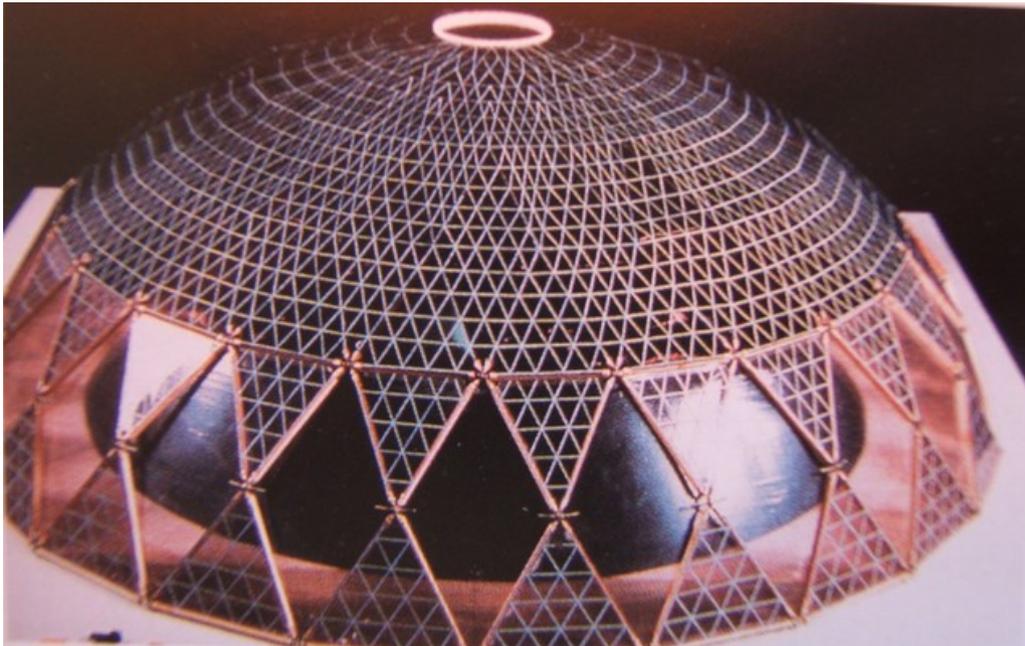
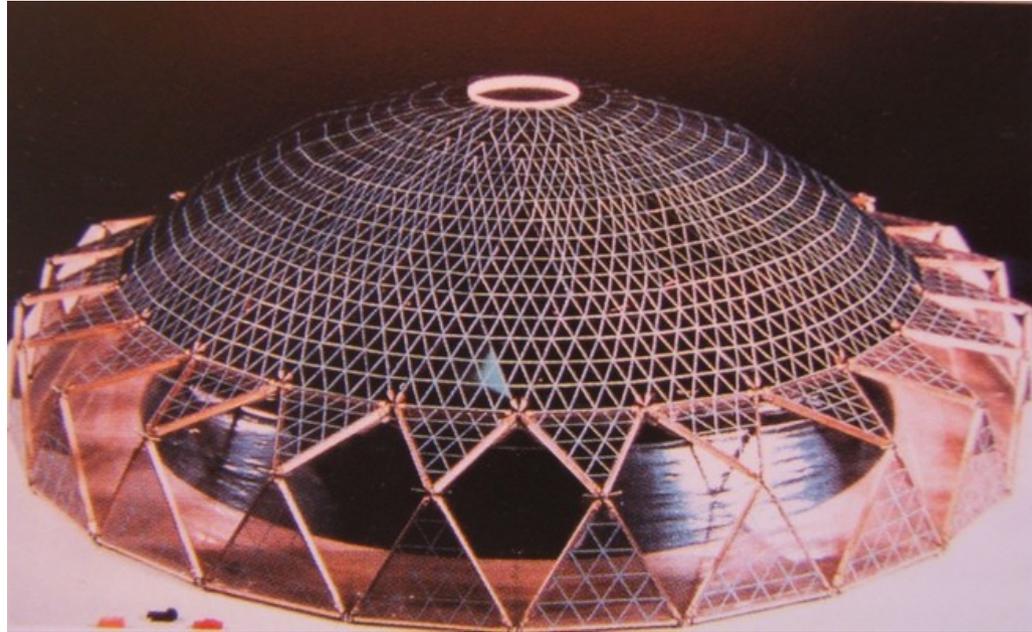
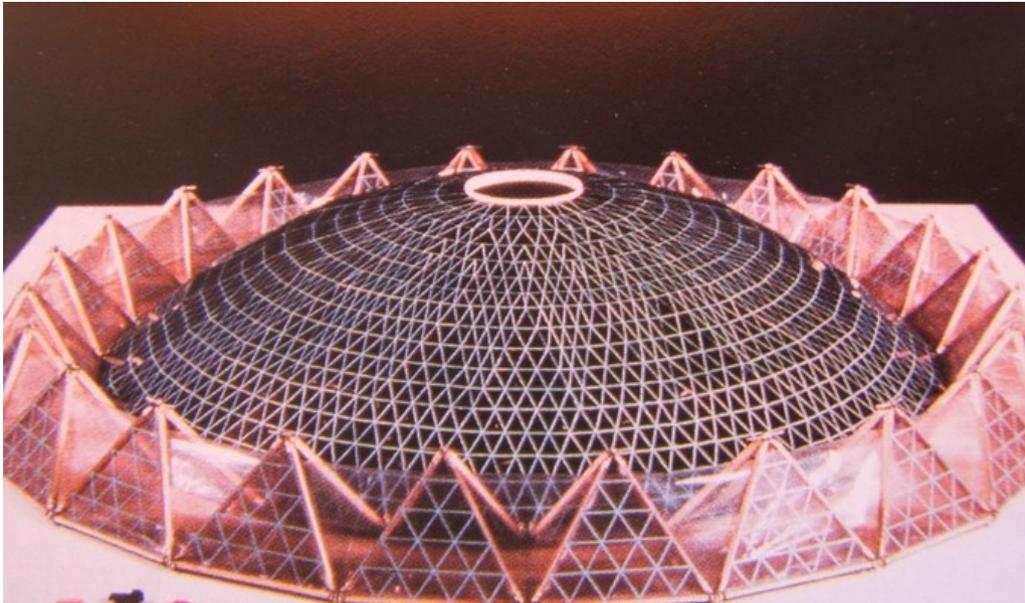
Pavillon des E.U., Exposition universelle de Montréal, 1967,  
Richard Buckminster Fuller

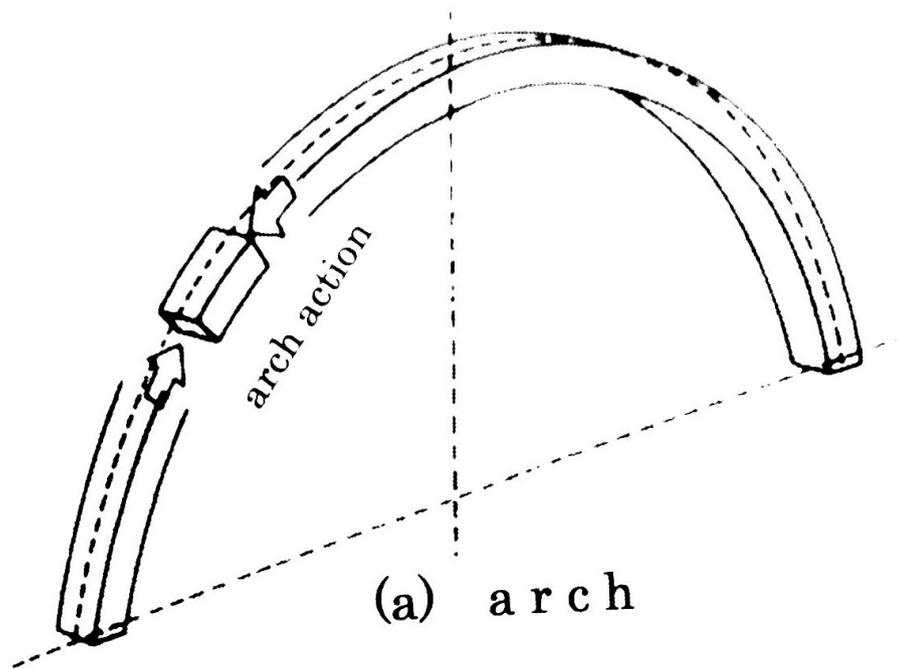




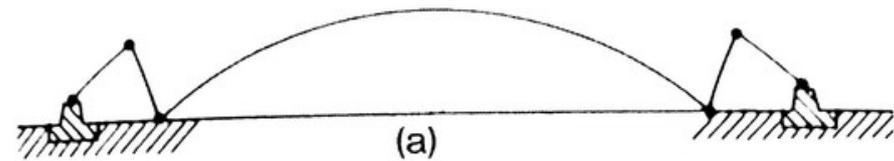
# Concept du « pentadome », Mamoru Kawaguchi

---

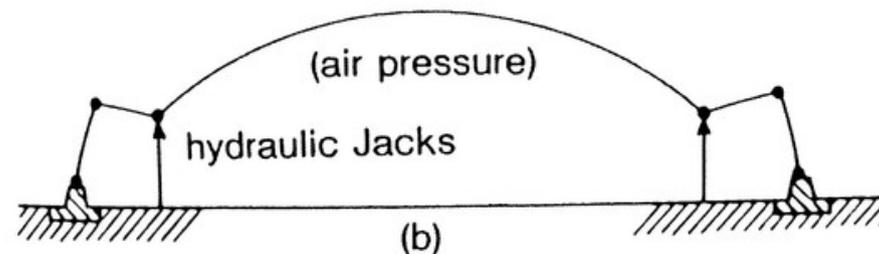




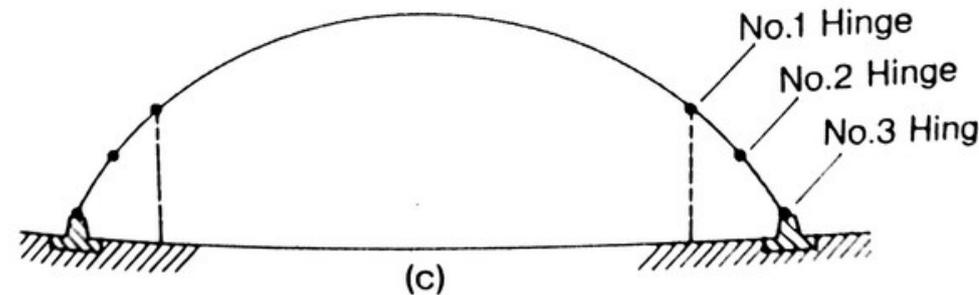
(a) arch



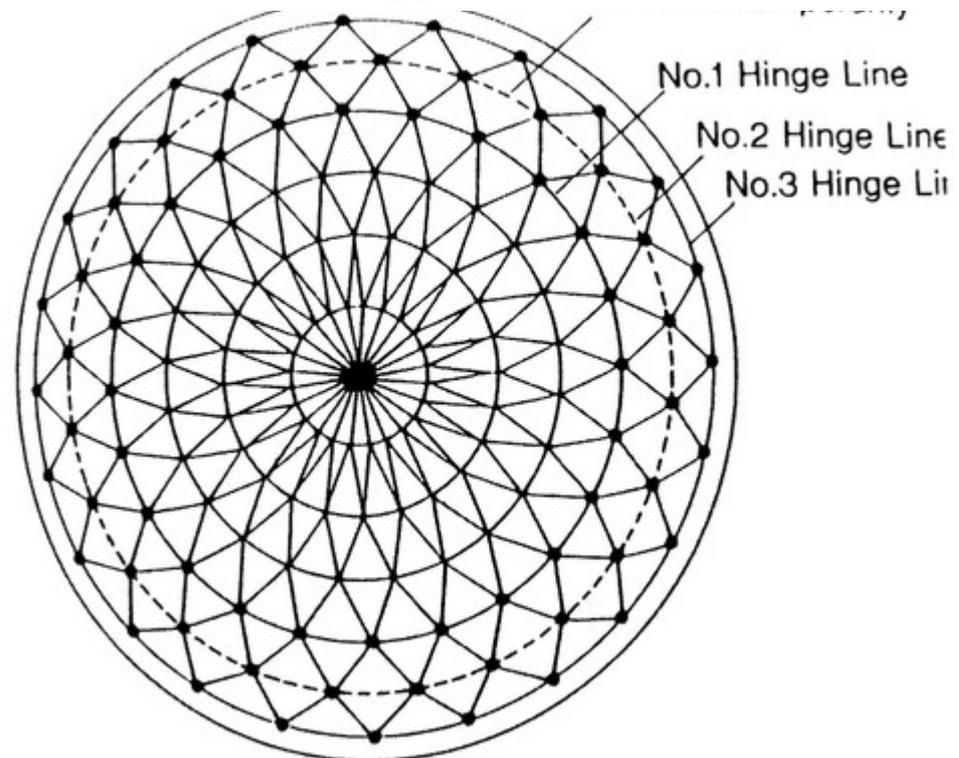
(a)



(b)



(c)

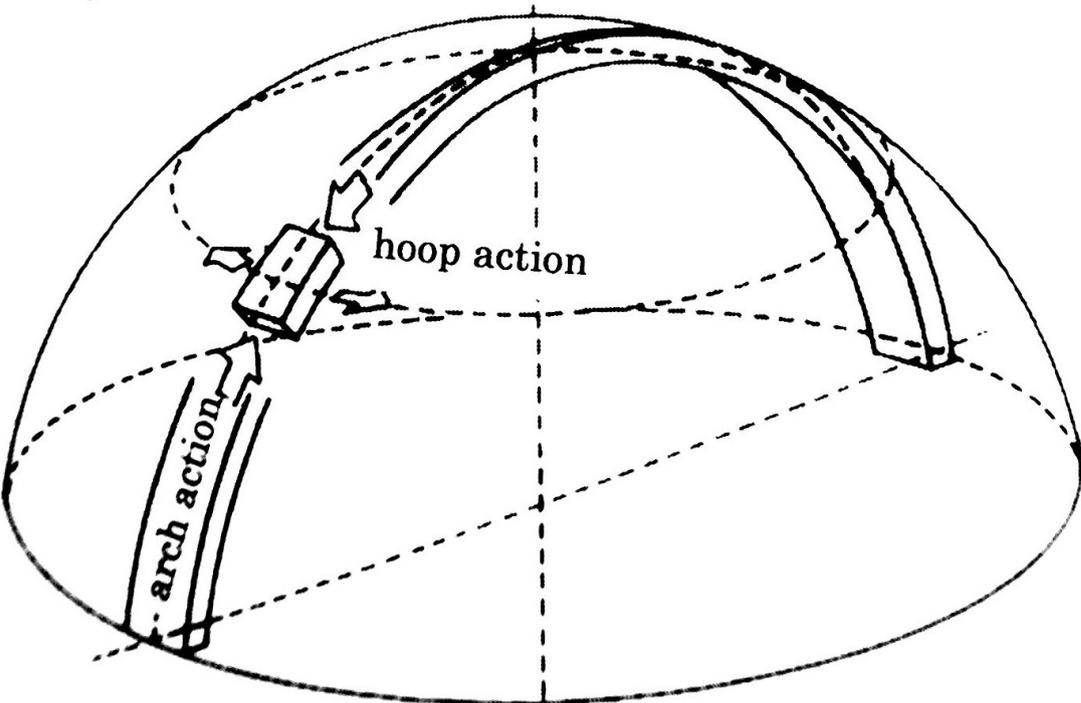


No.1 Hinge Line

No.2 Hinge Line

No.3 Hinge Line

(b) dome

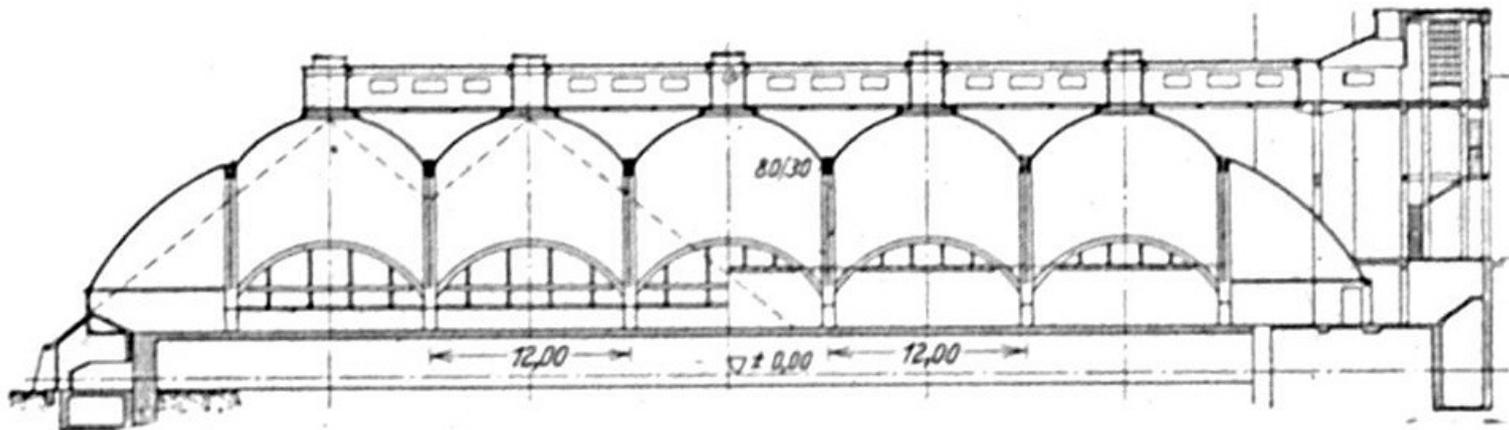
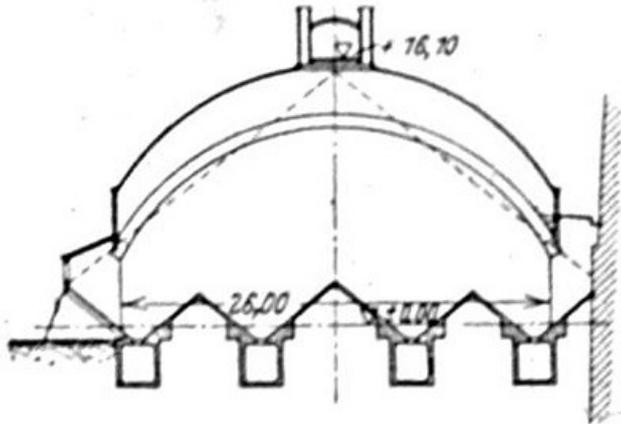


# Namihaya Dome, 1996, M. Kawaguchi



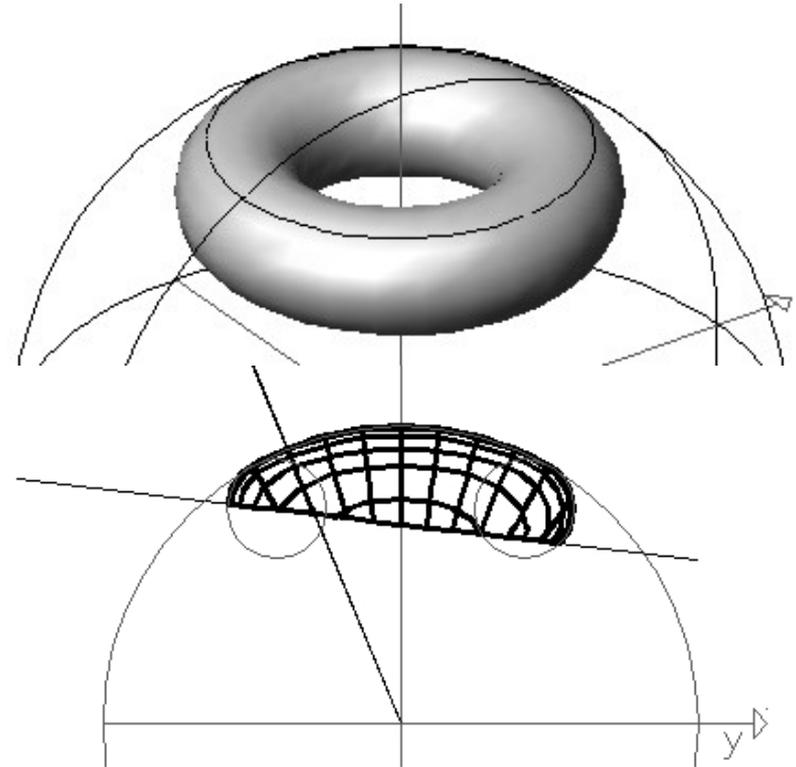
# Silo en Yougoslavie, Dischinger, 1930

Surfaces toriques et sphériques



# Meteor, Saint-Lazare, 2003, RFR, Charpentier Ass.

- Composition : tore+sphère
- Maillage : Courbes planes perpendiculaires
- Couverture : Panneaux à double courbure

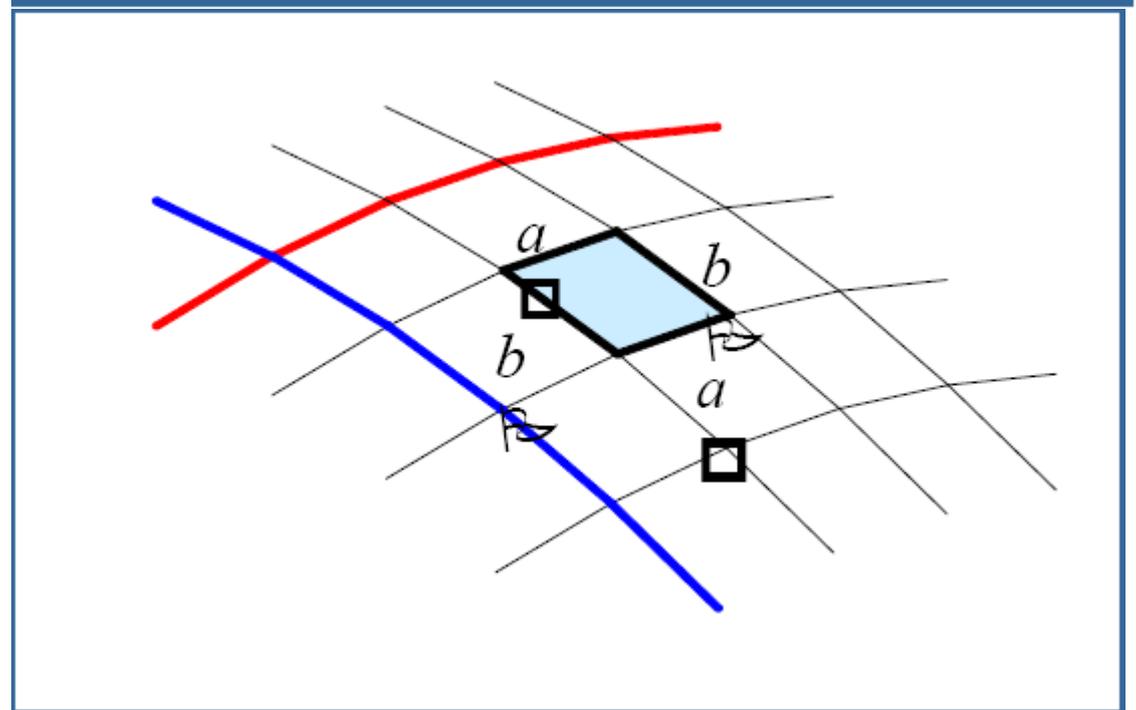
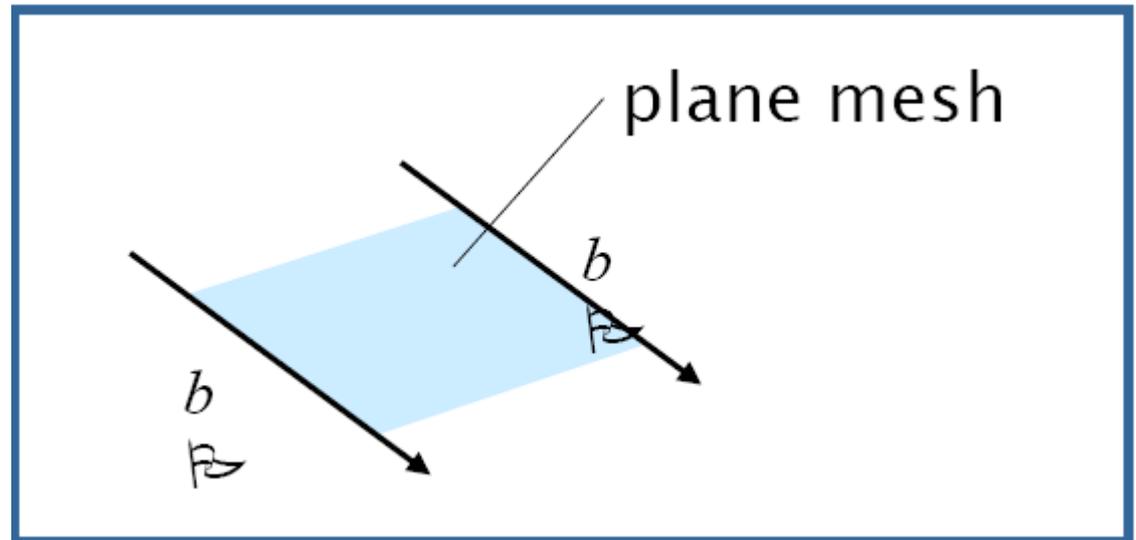


---

**Principes de génération de la géométrie 3**  
**Surfaces géométriquement contraintes**  
**Surfaces par translation**

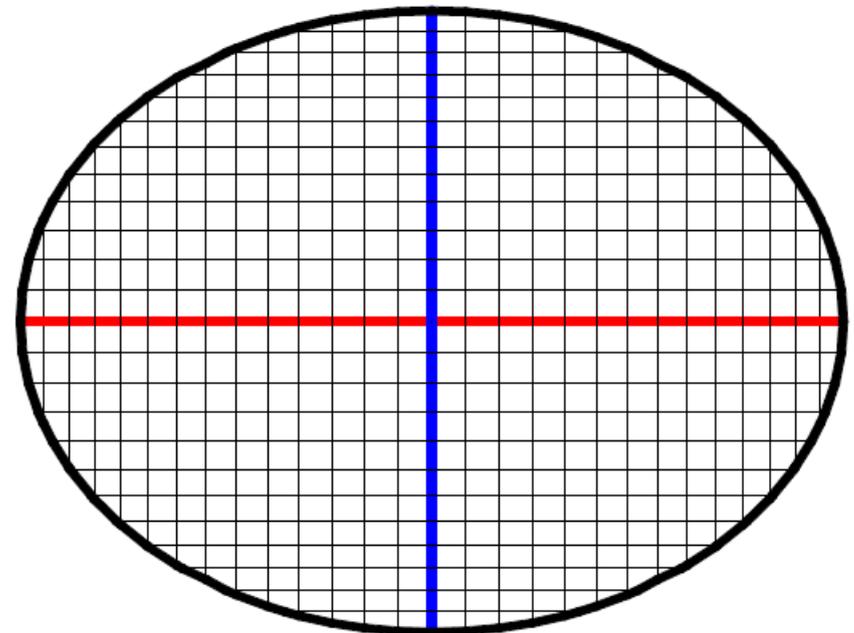
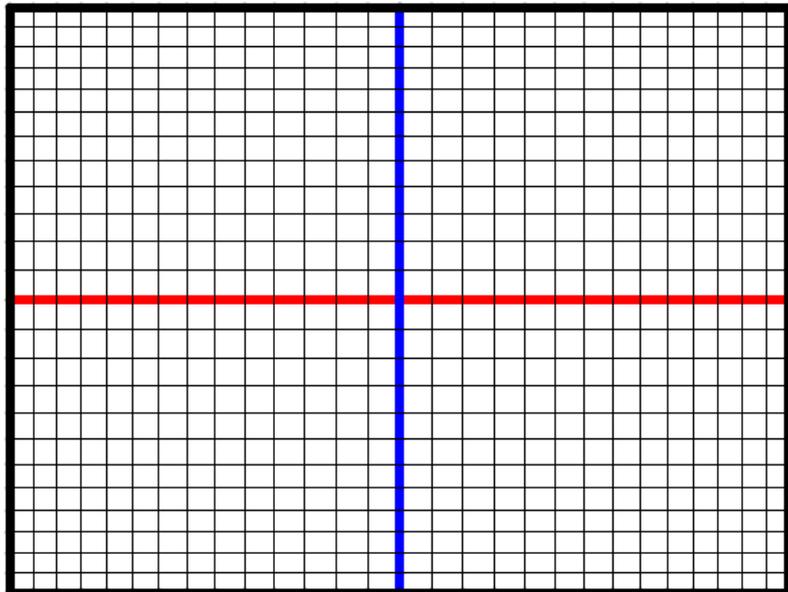
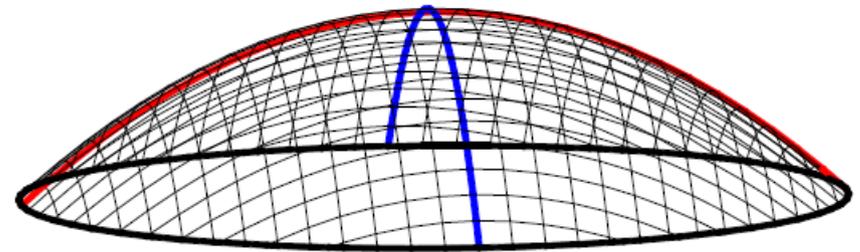
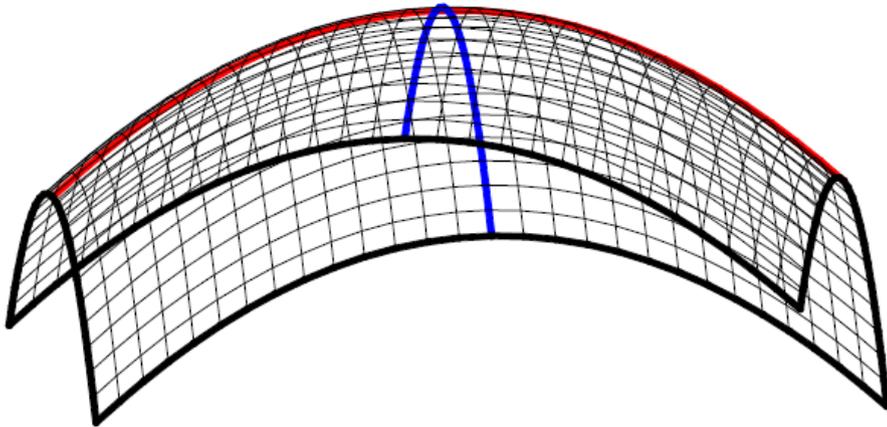
# Principes constructifs des surfaces de translation

Vecteurs deux à deux  
parallèles  
se propageant  
le long de 2 lignes  
définies librement.



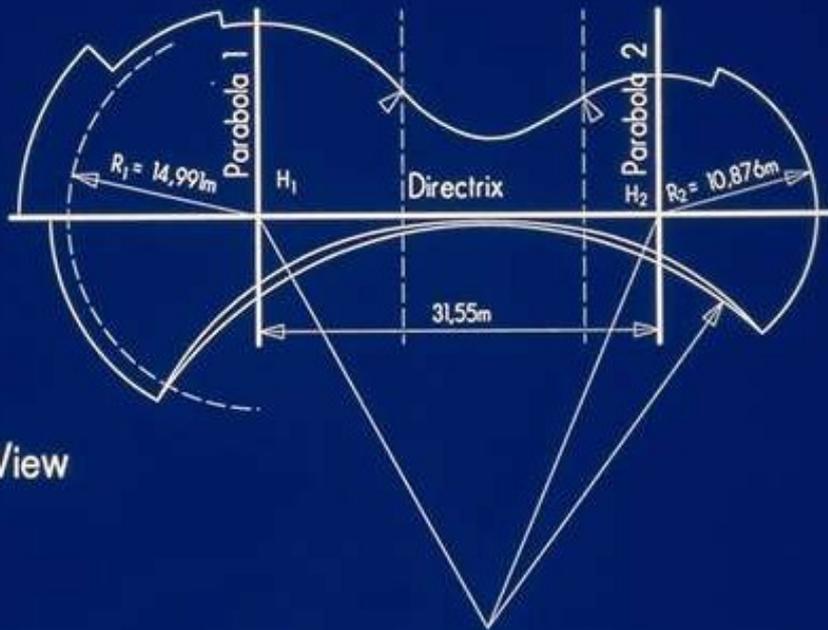
# Paraboloïde de translation

---

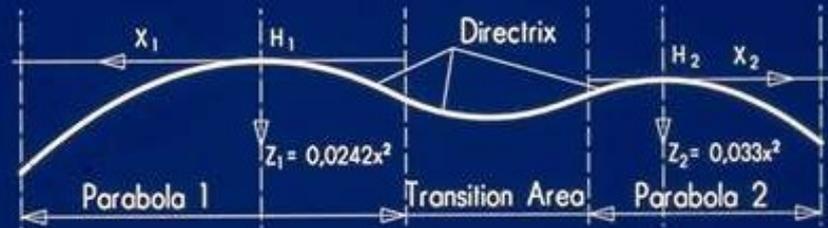


# « Bulle » des hippopotames Zoo de Berlin, SBP, 1998

Plan View



Section



Perspective





---

**Principes de génération de la géométrie 4**  
**Surfaces géométriquement contraintes**  
**Surfaces « libres », blobs,**  
**géométries non-standard...**

# Pas de référence formelle classique, usage prédominant des outils numériques 3D

De Blob, Eindhoven, Massimiliano  
Fuksas, 2009



Złote Tarasy (terrasses dorées),  
Varsovie, The Jerde, 2007.

Centre Pompidou, Metz,  
Shigeru Ban, 2010.



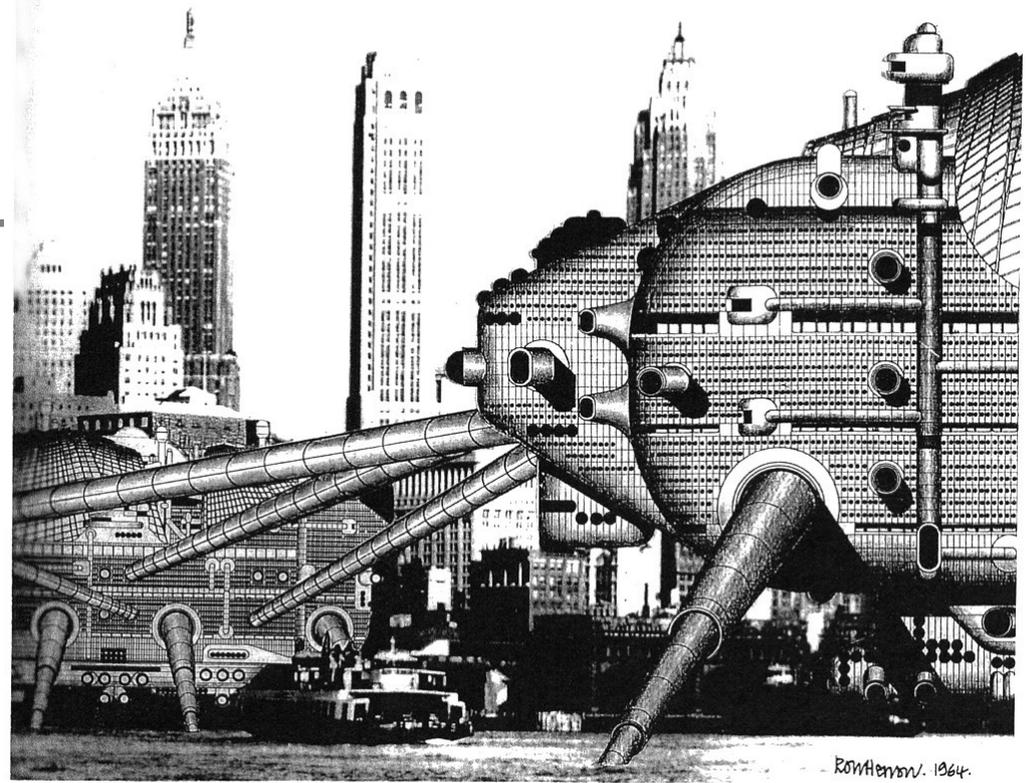
Pavillon Chanel, Zaha Hadid, Paris, 2008.



# Kunsthhaus, Graz, 2003

Peter Cook

(ex-membre Archigram)



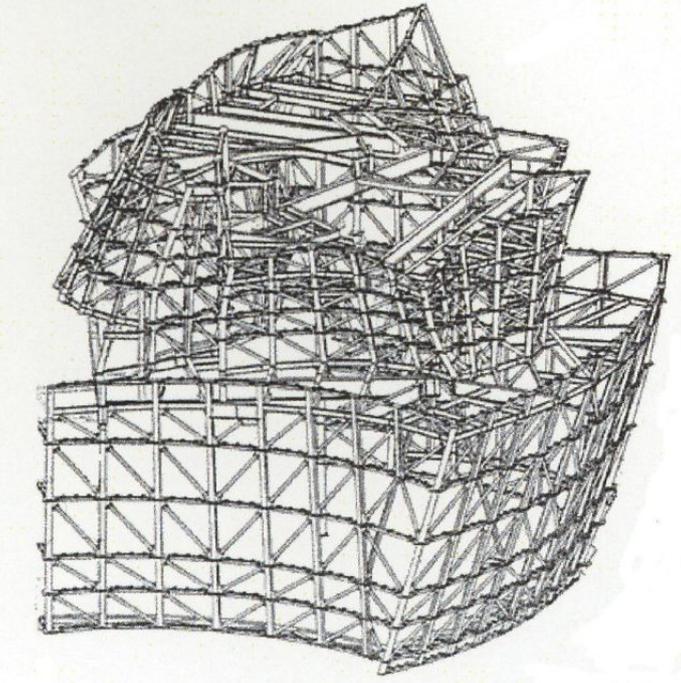
# Problèmes de matérialisation

Succession de couches  
sans réelle intelligibilité.

→ Dissociation Forme-Structure



Gehry Partners, Bilbao 1997 & Herford 2004



# Problèmes de matérialisation

---

Changement d'échelle et de matériau

→ Dissociation Forme-Structure-Technologie



Perte du tissage



# Nécessaire maîtrise de la forme et de sa complexité

---

- Compétences partagées (Ingé. / Archi. / Entreprise)
  - Outil interopérable
  
  - Modèles physiques
  - Modèles numériques : formes à points de contrôle
    - Calculées mais jamais dessinées,
    - Problème de représentation mentale des processus générateurs.
- Complexité n'est pas complication.

---

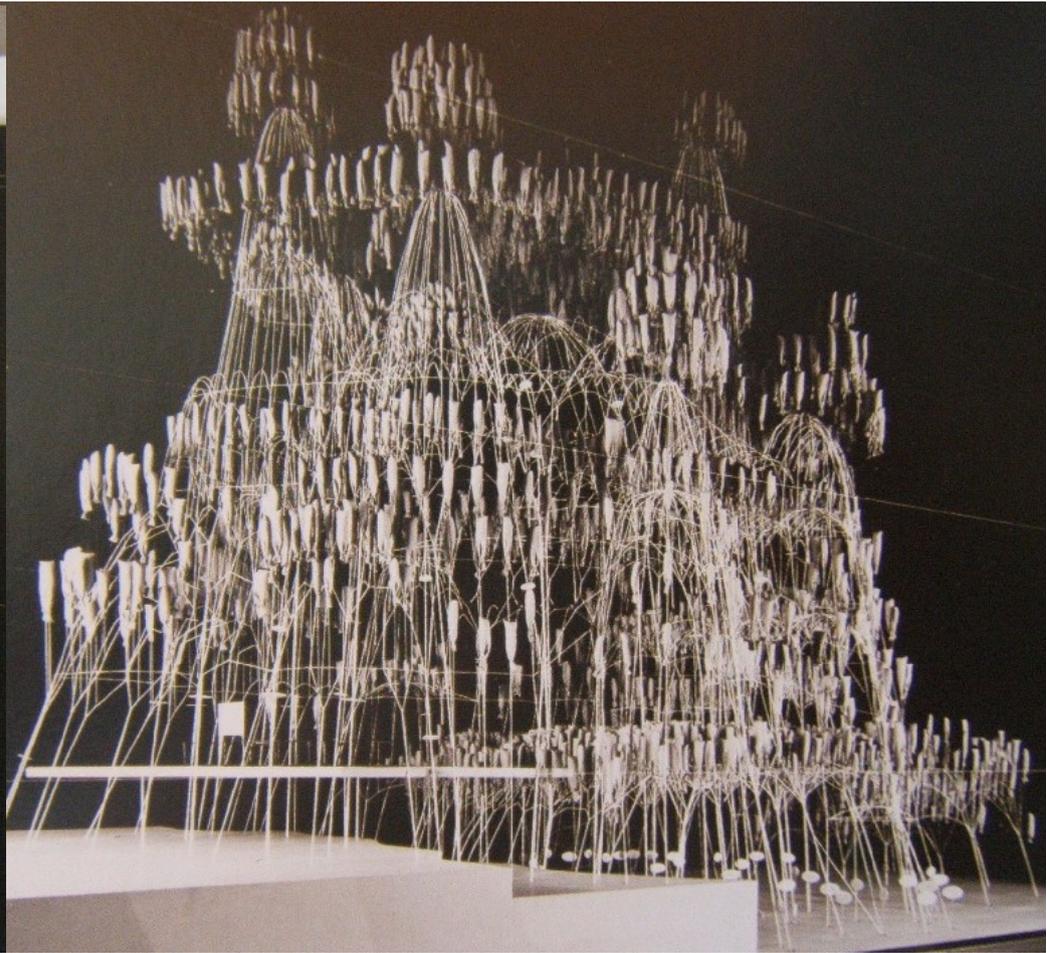
**Principes de génération de la géométrie 5**

**Surfaces mécaniquement contraintes**

**Funiculaires**

# Funiculaires par inversion : Étude de la Sagrada Familia, A. Gaudi

---



# Centre des Nouvelles Industries et Technologies

---

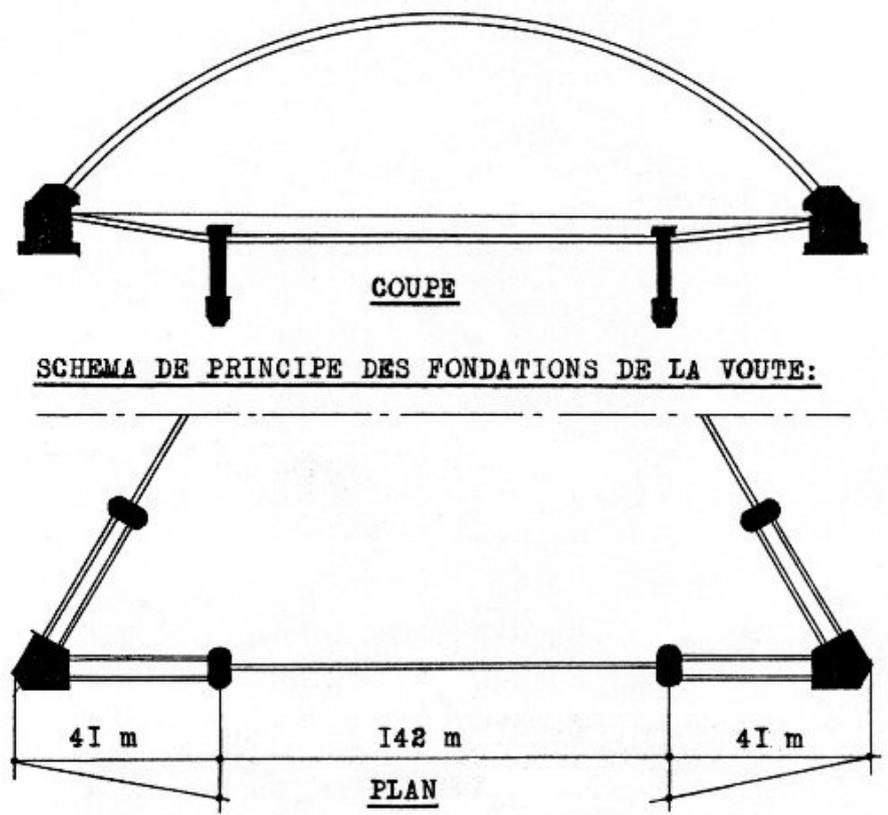
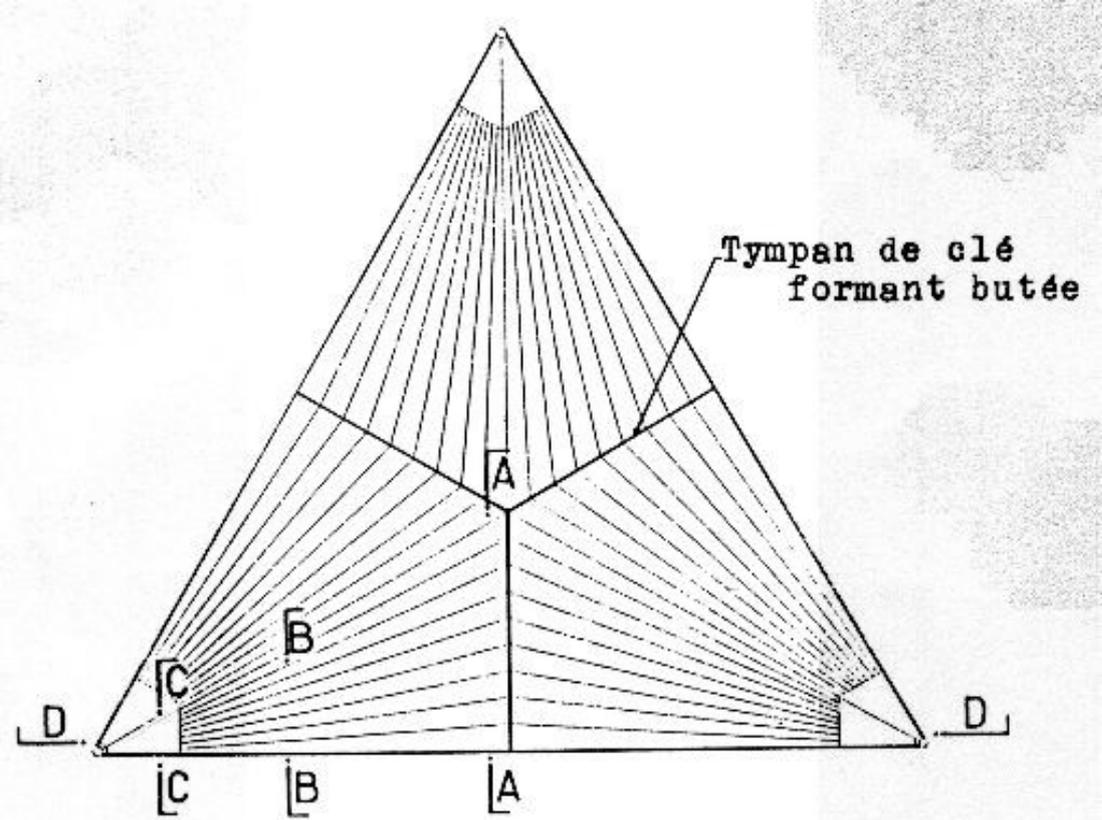
1958, Ing. Esquillan, Arch.: Camelot, Mailly, Zehrfuss

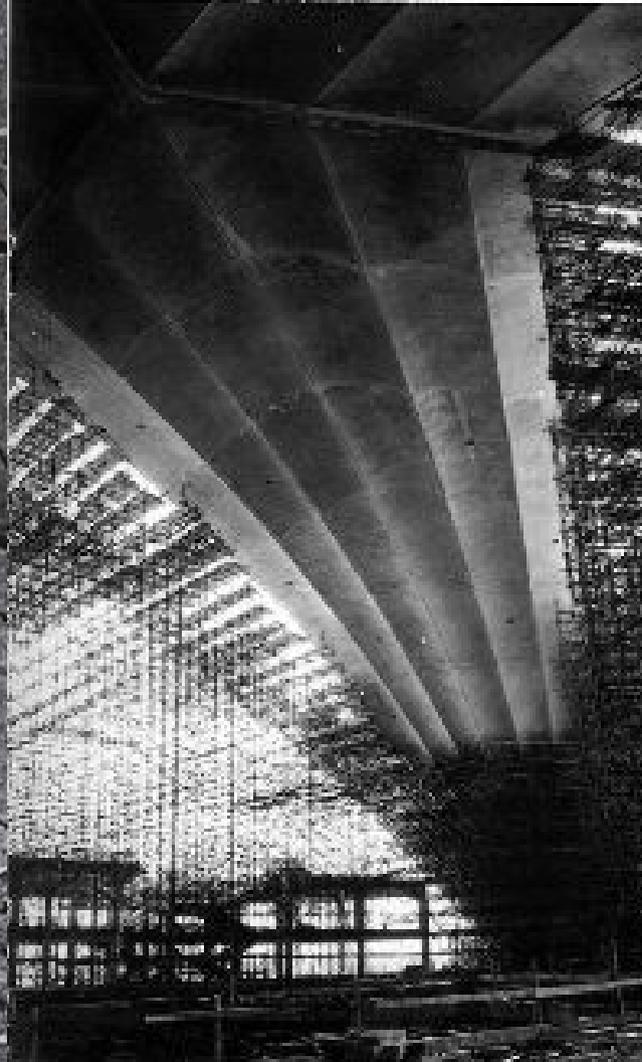
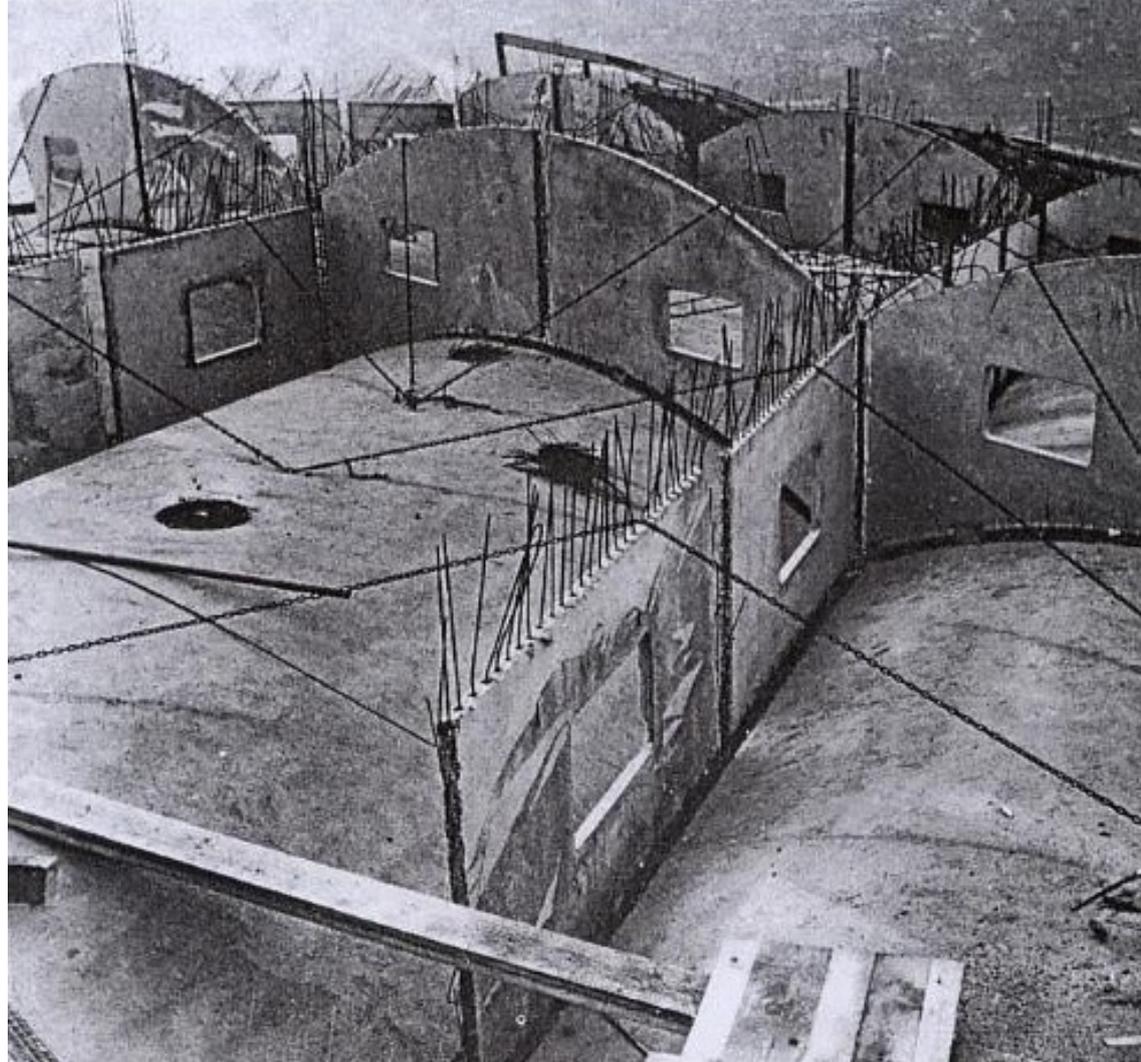
Record du monde  
de portée: 218 m

Double coque  
de 2 fois 6,35 cm

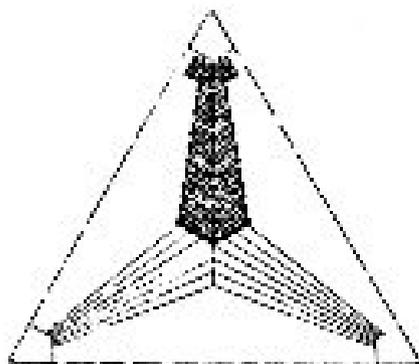
Surface couverte 2 ha



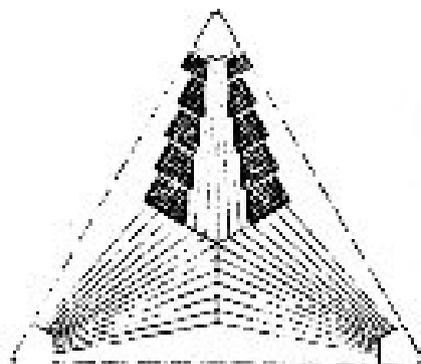




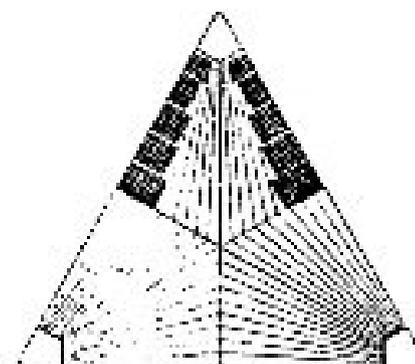
1<sup>e</sup> FUSEAU



2<sup>e</sup> FUSEAU



3<sup>e</sup> FUSEAU

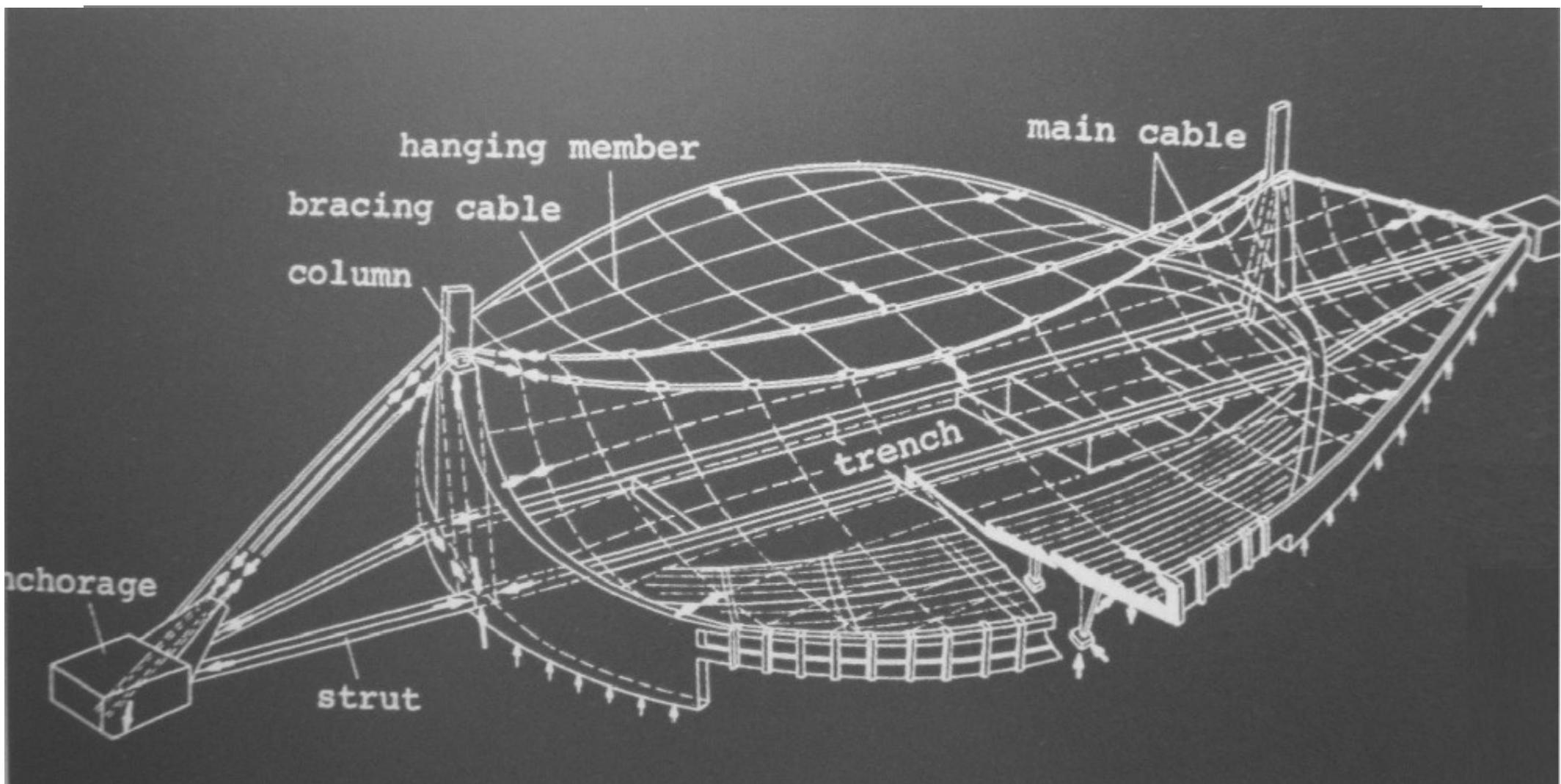


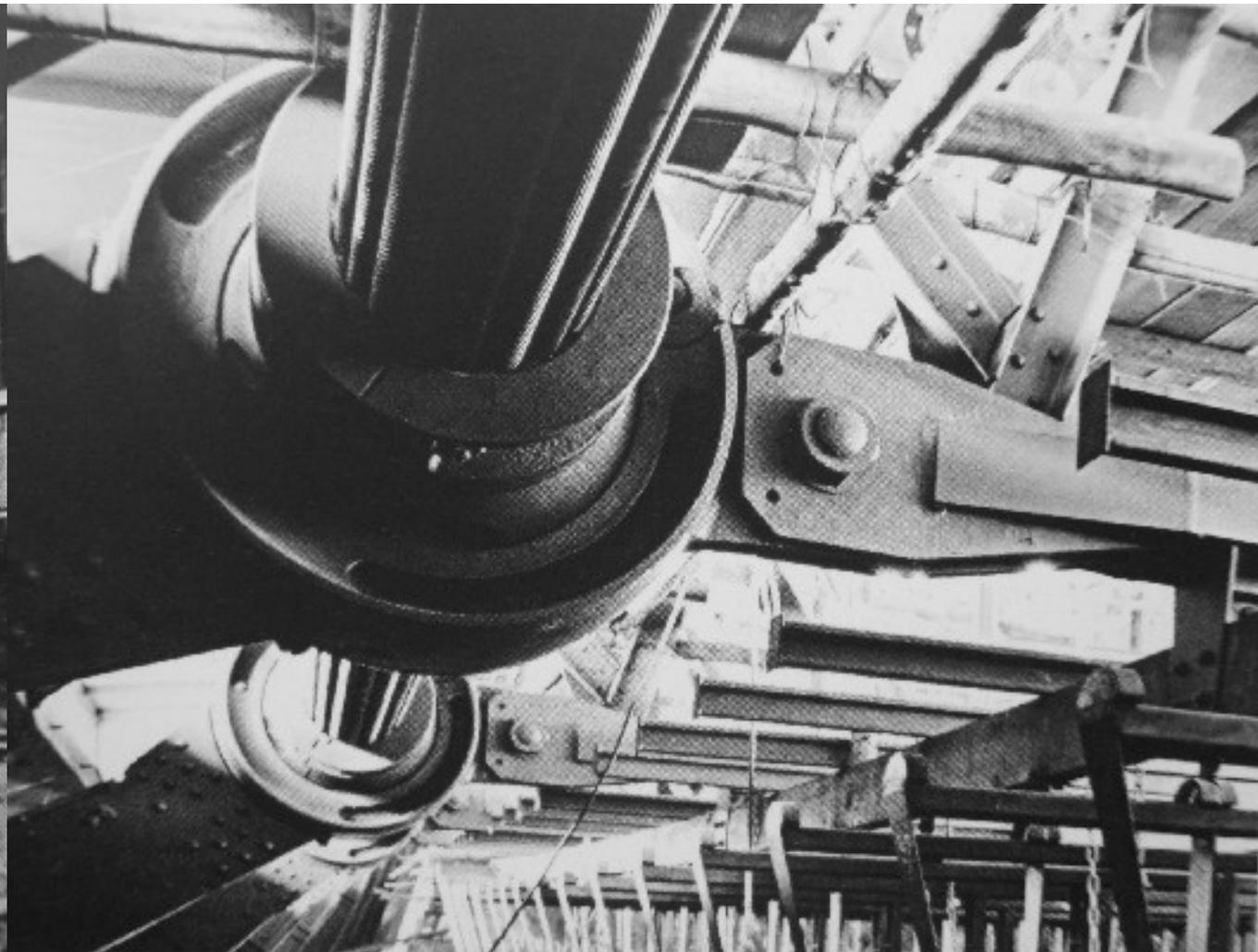
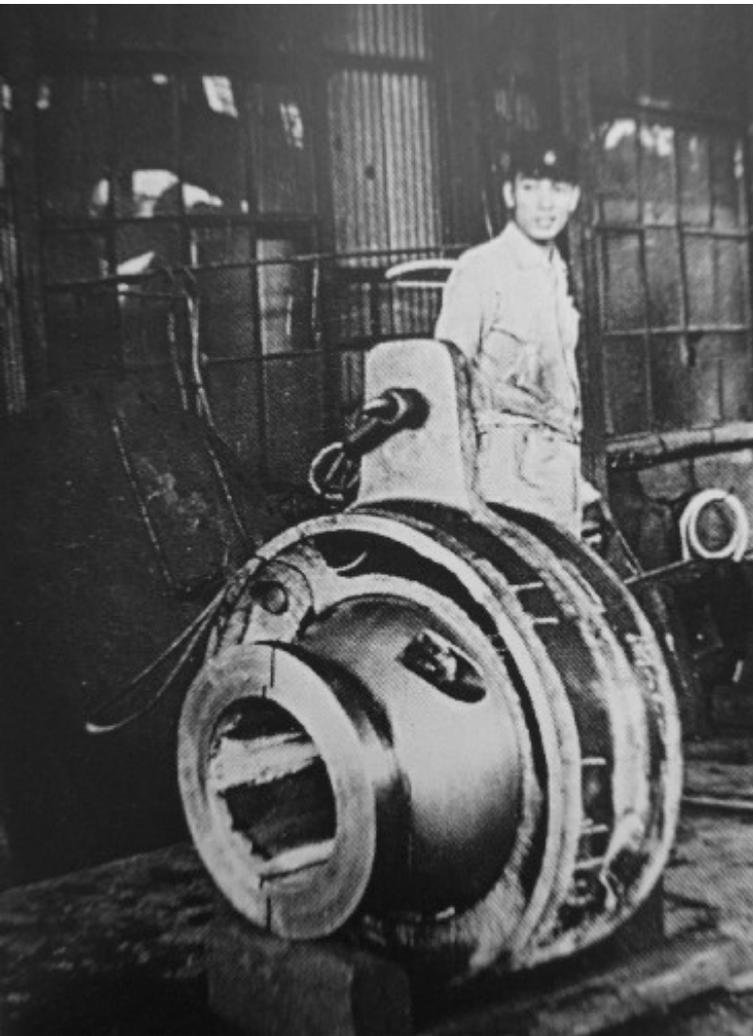


# Yoyogi indoor stadium Tokyo, 1964, Tsuboi & Kawaguchi

---







---

**Principes de génération de la géométrie 6**

**Surfaces mécaniquement contraintes**

**Surfaces en tension**

# Couplage Forme-Force

---

Équilibre normal des membranes :

$$p = \frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2}$$

Si  $p=0$ , alors :

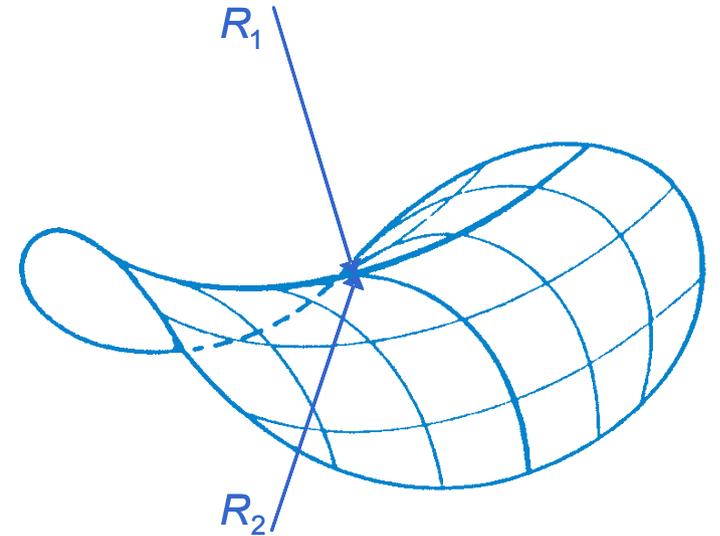
=> Surfaces tendues :  $T_1 < 0$  et  $T_2 < 0$

& Surfaces anticlastiques ( $R_1$  et  $R_2$  de signes opposés)

Si  $R_1$  et  $R_2$  de même signes (surfaces synclastiques)

=> surfaces tendues si pression normale (str. gonflables)

=> surfaces comprimées si pression gravitaire (coques)



# Problématique de la recherche de forme

---

Trouver des formes en équilibre ou qui soient compatibles avec un processus de montage (gridshell).



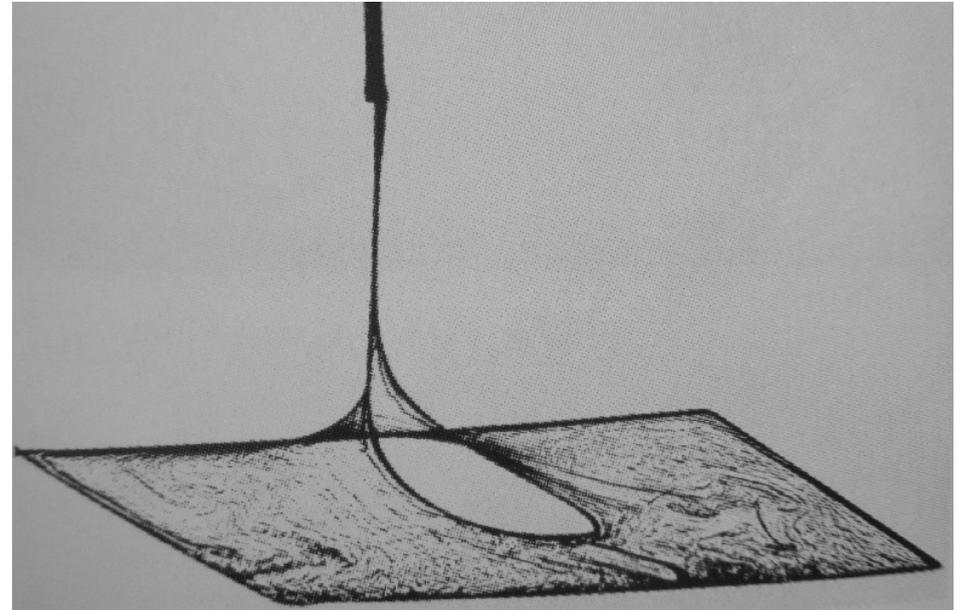
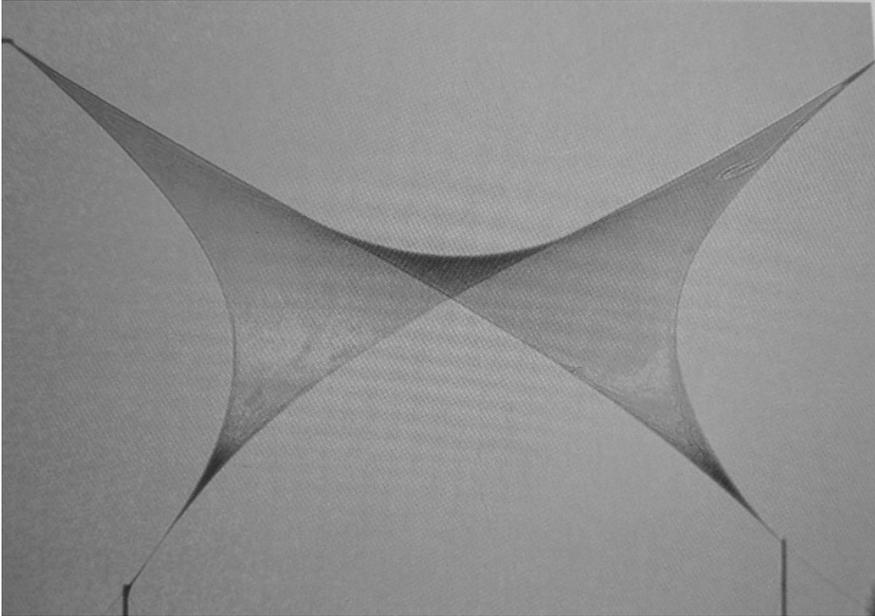
Connaître les efforts de précontraintes

Contrôler les surcontraintes et les déplacements

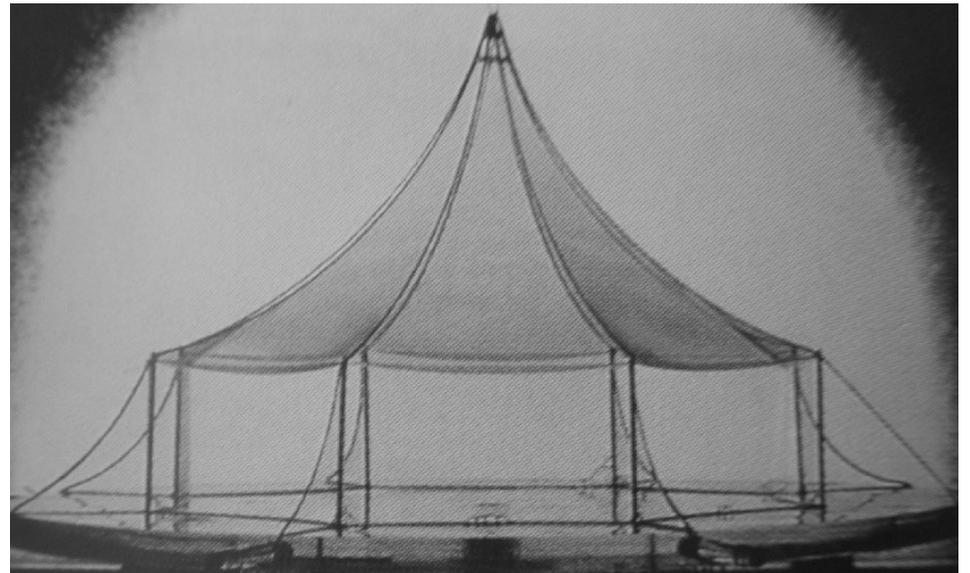
Contrôler la forme et son esthétique

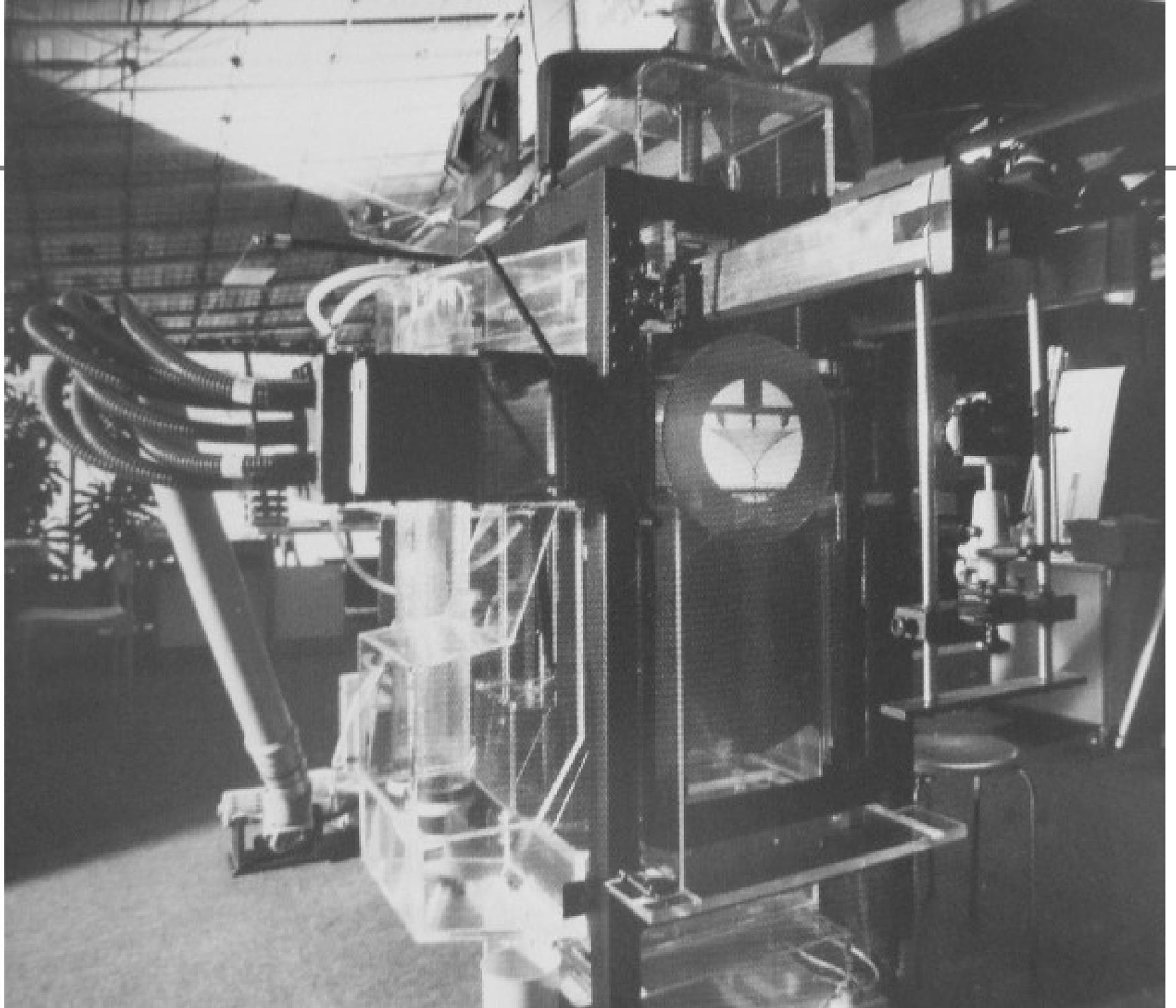
# Méthodes expérimentales I : Bulles de savon ( surfaces minimales: $T_1 = T_2$ )

---



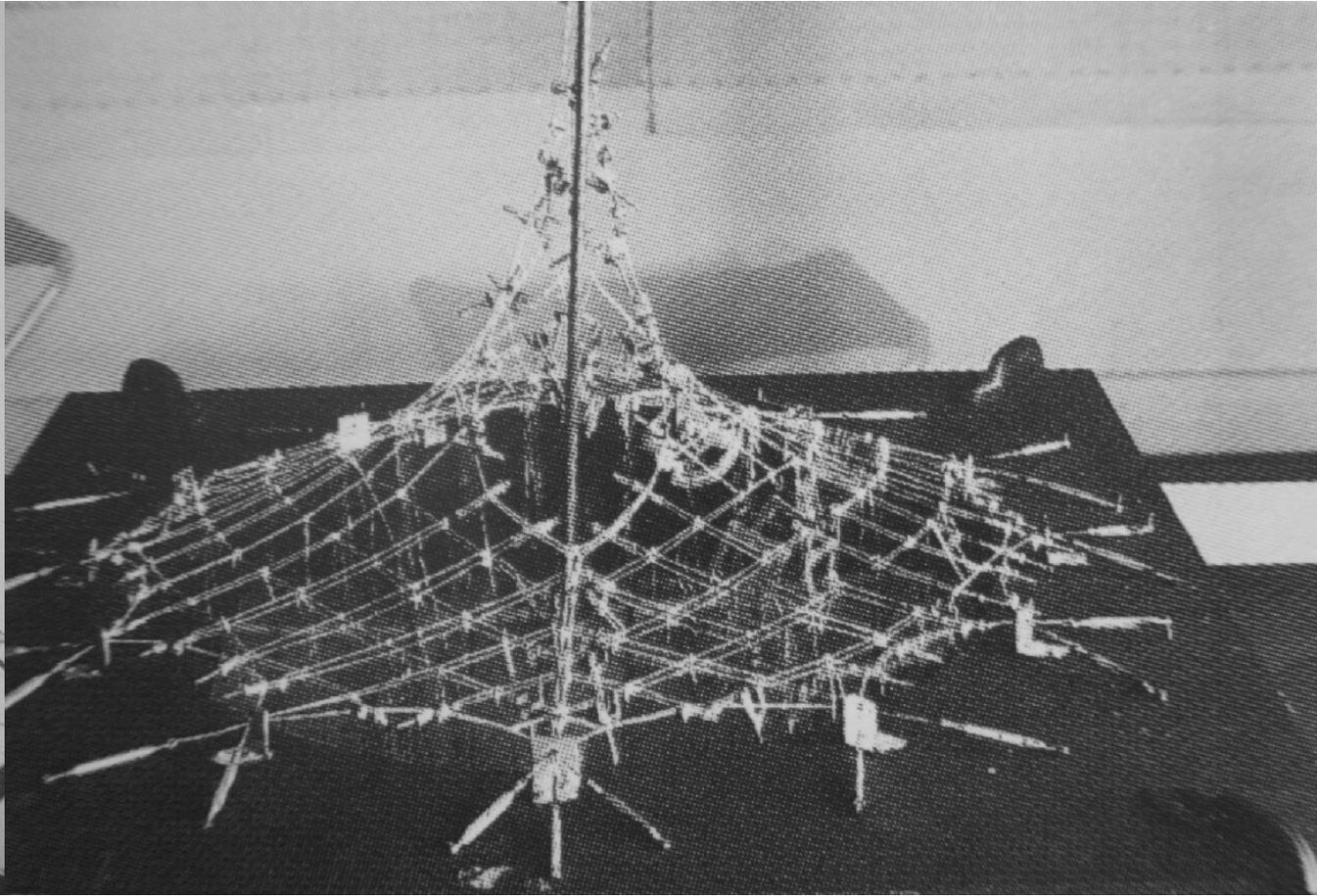
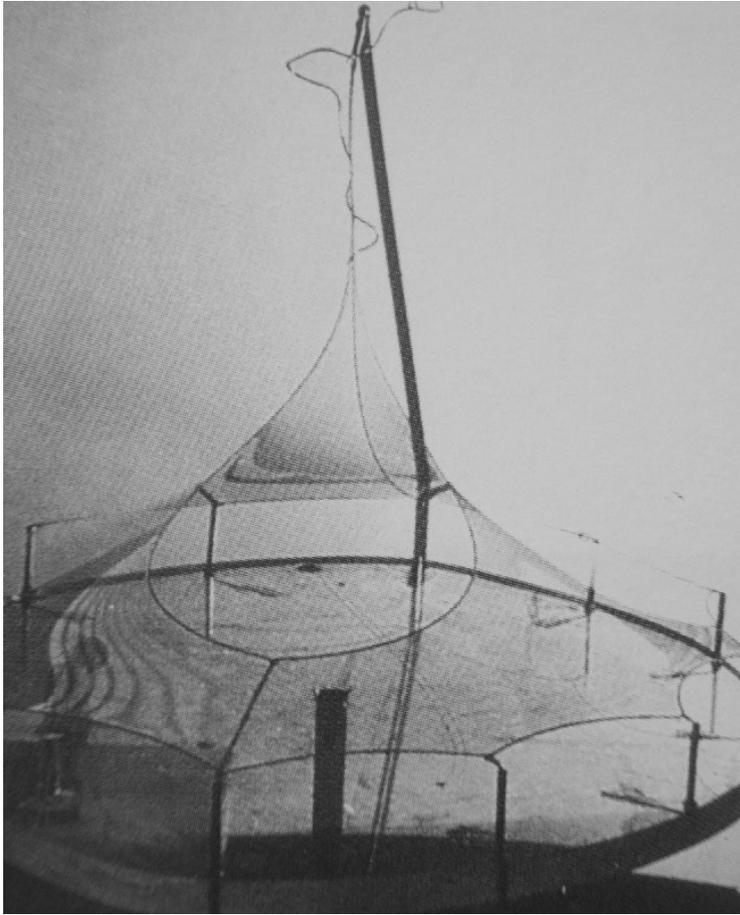
Photos d'après des programmes  
expérimentaux IL Stuttgart, F Otto,  
1960-1980





# Modèles physiques de grande précision

---

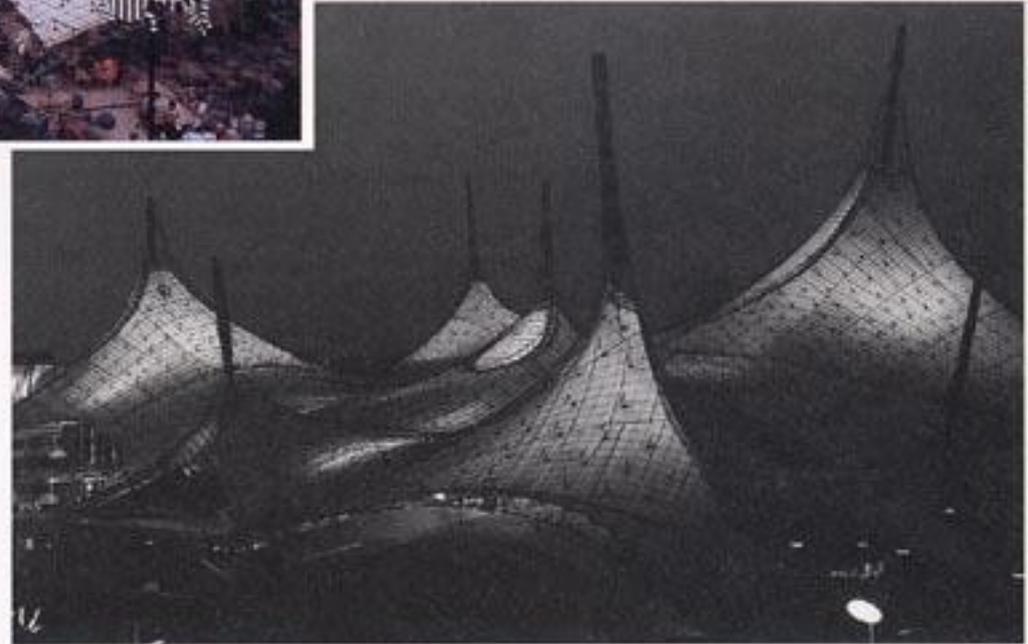
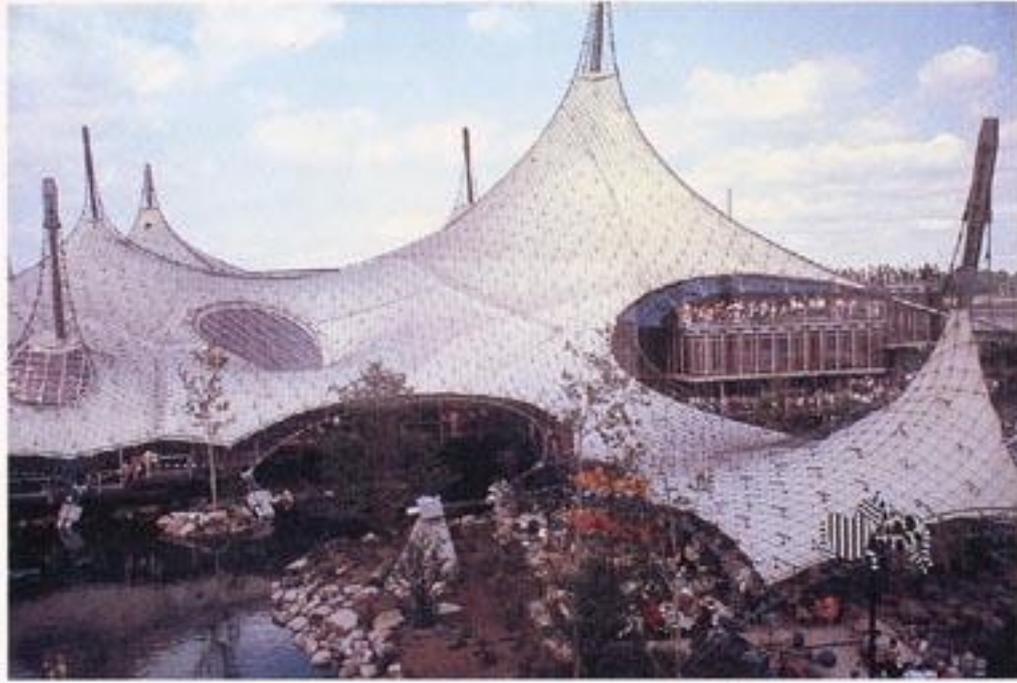






# Pavillon allemand, Montréal Expo, 1967

---



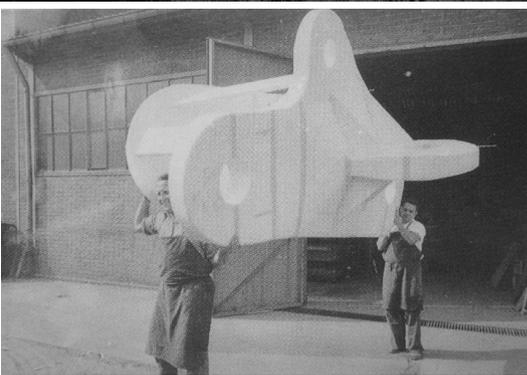
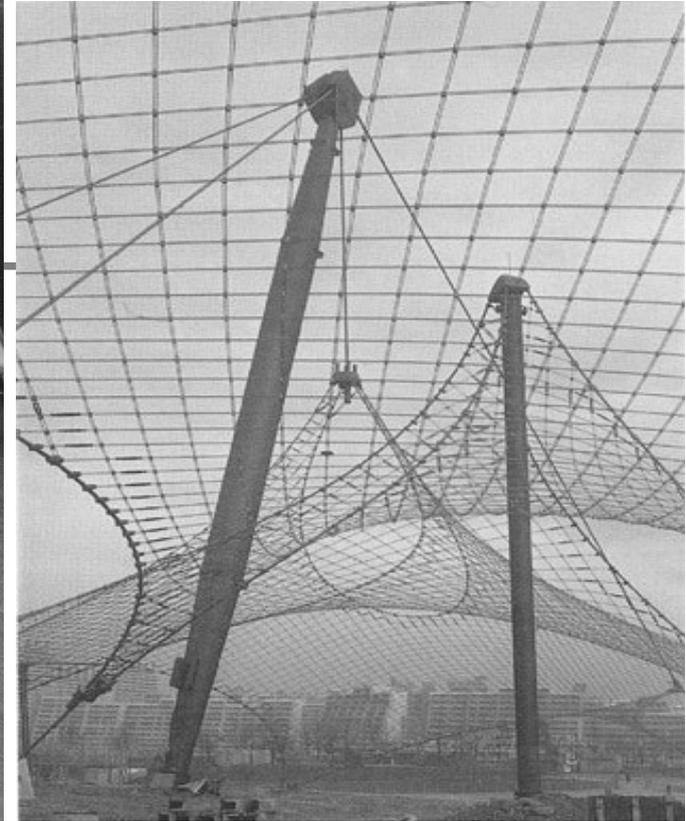
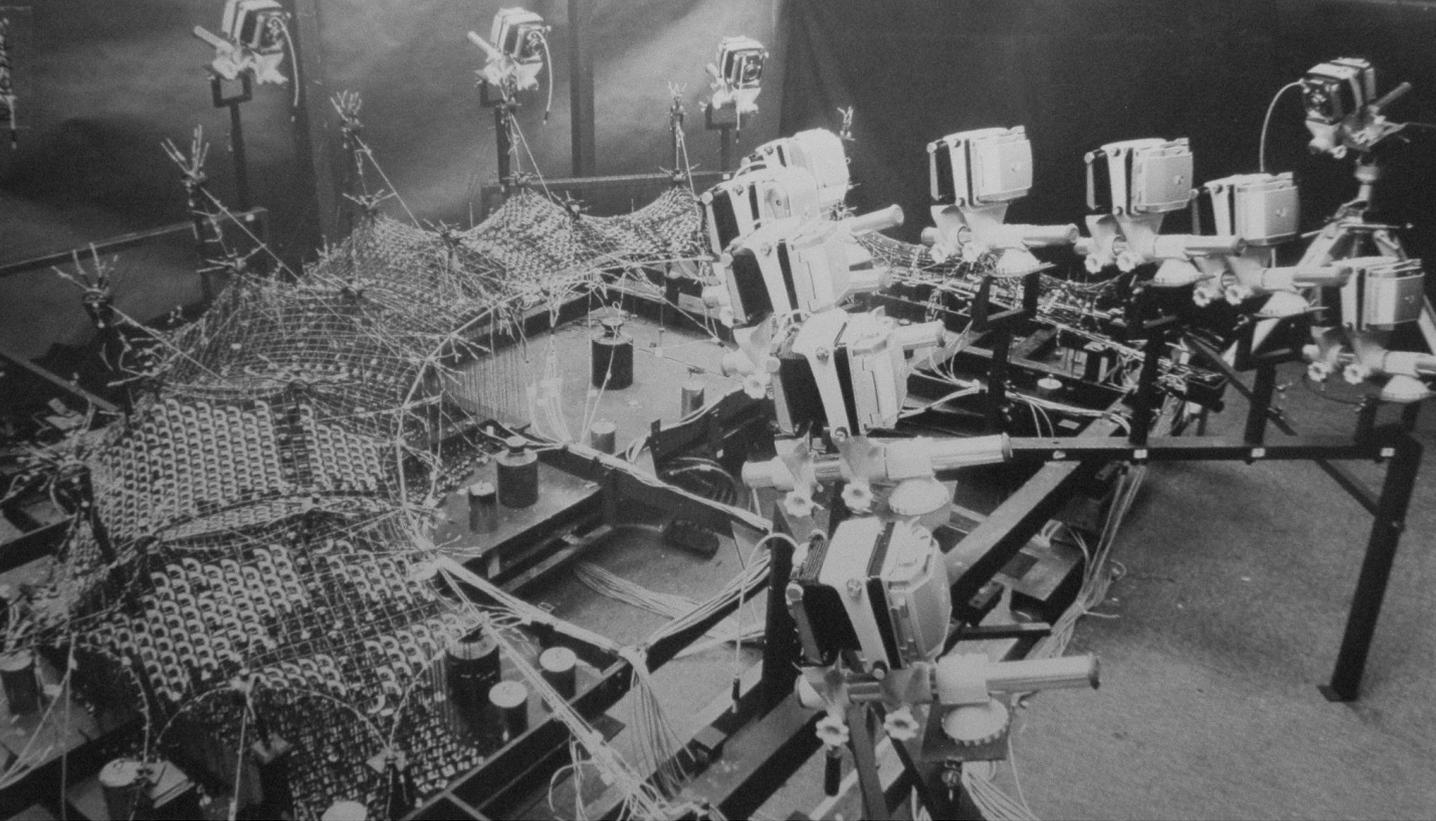
**Stade Olympique de  
Munich, 1972**

---

**Architectes:  
Behnisch &  
Partner, F. Otto,**

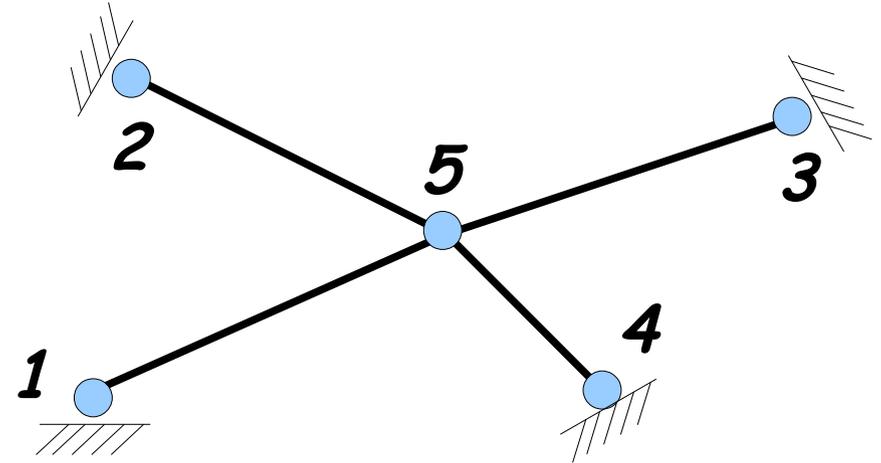
**Ingénieurs:  
F. Leonhardt,  
J. Schlaich**





# Méthode des densités de force I

Équilibre d'un système de câbles



$$f_1 \frac{X_5 - X_1}{l_1} + f_2 \frac{X_5 - X_2}{l_2} + f_3 \frac{X_5 - X_3}{l_3} + f_4 \frac{X_5 - X_4}{l_4} = 0$$

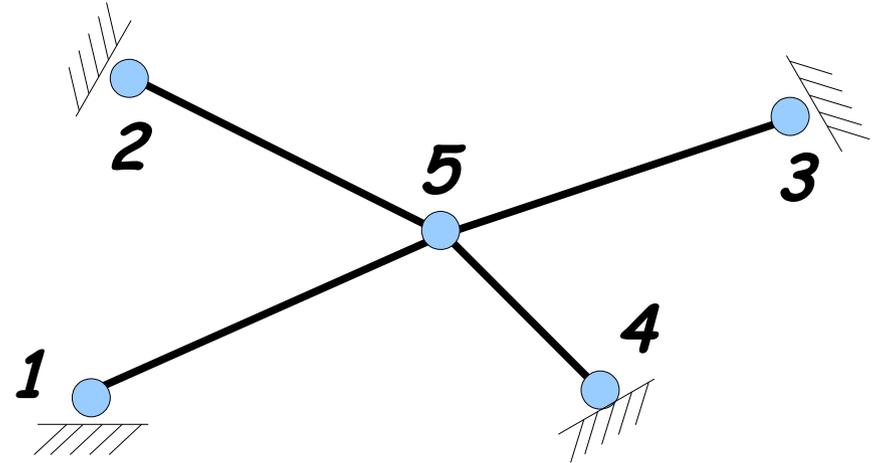
$$f_1 \frac{y_5 - y_1}{l_1} + f_2 \frac{y_5 - y_2}{l_2} + f_3 \frac{y_5 - y_3}{l_3} + f_4 \frac{y_5 - y_4}{l_4} = 0$$

$$f_1 \frac{Z_5 - Z_1}{l_1} + f_2 \frac{Z_5 - Z_2}{l_2} + f_3 \frac{Z_5 - Z_3}{l_3} + f_4 \frac{Z_5 - Z_4}{l_4} = 0$$

# Méthode des densités de force II

Coefficients de densité de force

$$q_i = \frac{f_i}{l_i}$$



$$\frac{f_1}{l_1}(x_5 - x_1) + \frac{f_2}{l_2}(x_5 - x_2) + \frac{f_3}{l_3}(x_5 - x_3) + \frac{f_4}{l_4}(x_5 - x_4) = 0$$

$$\frac{f_1}{l_1}(y_5 - y_1) + \frac{f_2}{l_2}(y_5 - y_2) + \frac{f_3}{l_3}(y_5 - y_3) + \frac{f_4}{l_4}(y_5 - y_4) = 0$$

$$\frac{f_1}{l_1}(z_5 - z_1) + \frac{f_2}{l_2}(z_5 - z_2) + \frac{f_3}{l_3}(z_5 - z_3) + \frac{f_4}{l_4}(z_5 - z_4) = 0$$

# Méthode des densités de force III

---

Linéarisation du système

$$(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)x_5 = q_1x_1 + q_2x_2 + q_3x_3 + q_4x_4$$

$$(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)y_5 = q_1y_1 + q_2y_2 + q_3y_3 + q_4y_4$$

$$(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)z_5 = q_1z_1 + q_2z_2 + q_3z_3 + q_4z_4$$

Calcul des coordonnées

Calcul des longueurs

Calcul des efforts dans les câbles:

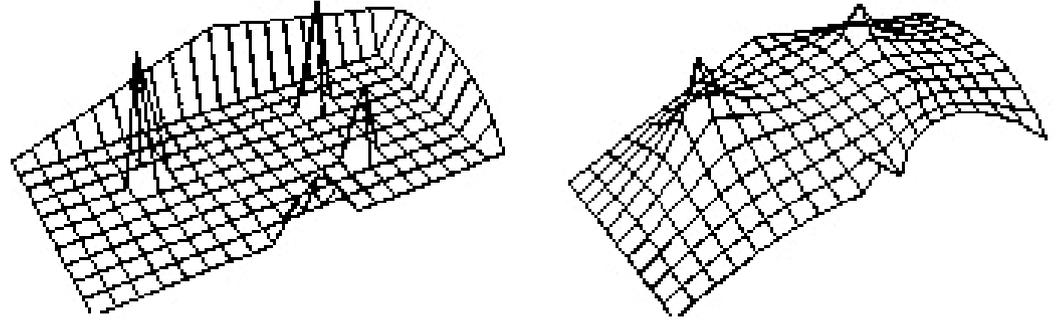
$$f_i = q_i l_i$$

# Méthode des densités de force IV

---

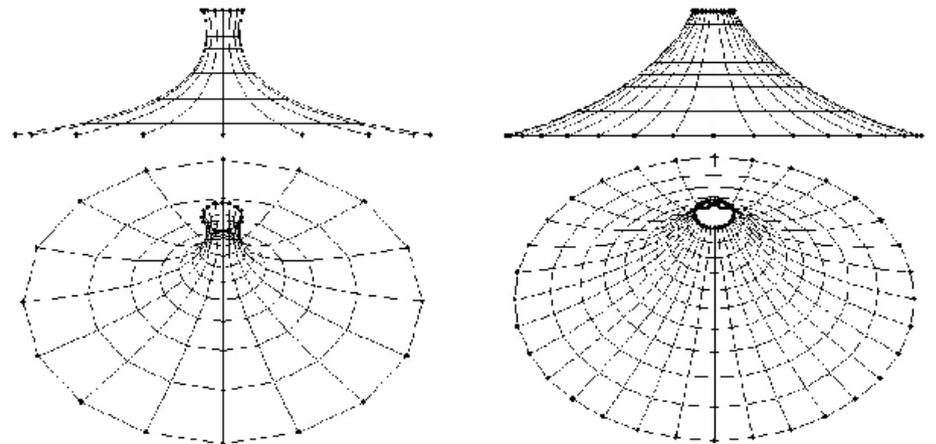
## Avantages:

- Programmation facile;
- Calculs rapides;
- Plusieurs formes pour des conditions aux limites identiques;
- Extension aux éléments de surfaces tendues



## Inconvénients:

- Influence du maillage
- Logiciels dédiés (Fce, All.)



# Autres méthodes numériques

---

## Méthode des éléments finis:

- Historiquement États-Unis et Japon
- De plus en plus populaire, notamment via la « Update Reference Strategy » (All., RhinoMembrane)

## Méthode de relaxation dynamique:

- Historiquement Royaume-Uni
- Éléments câbles et membranes
- Méthode stable mais plus lente que densités de force
- Possibilité d'imposer des contraintes -> surfaces minimales

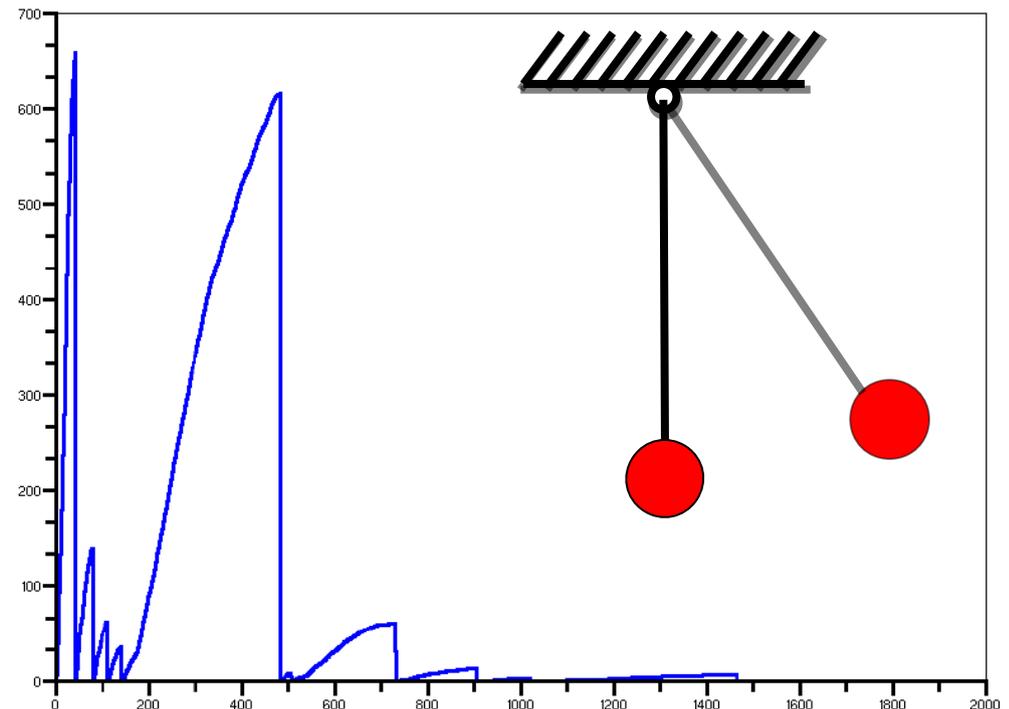
# Principe de la méthode de relaxation dynamique

---

Recherche de la position d'équilibre statique par un calcul dynamique amorti fictif.

Amortissement cinétique: Absorption ponctuelle de l'énergie cinétique à chaque pic.

État initial perturbé:  
Oscillations libres,  
l'énergie cinétique augmente ;  
au pic, arrêt de la structure,  
puis nouvelles oscillations.



---

**Principes de génération de la géométrie 7**

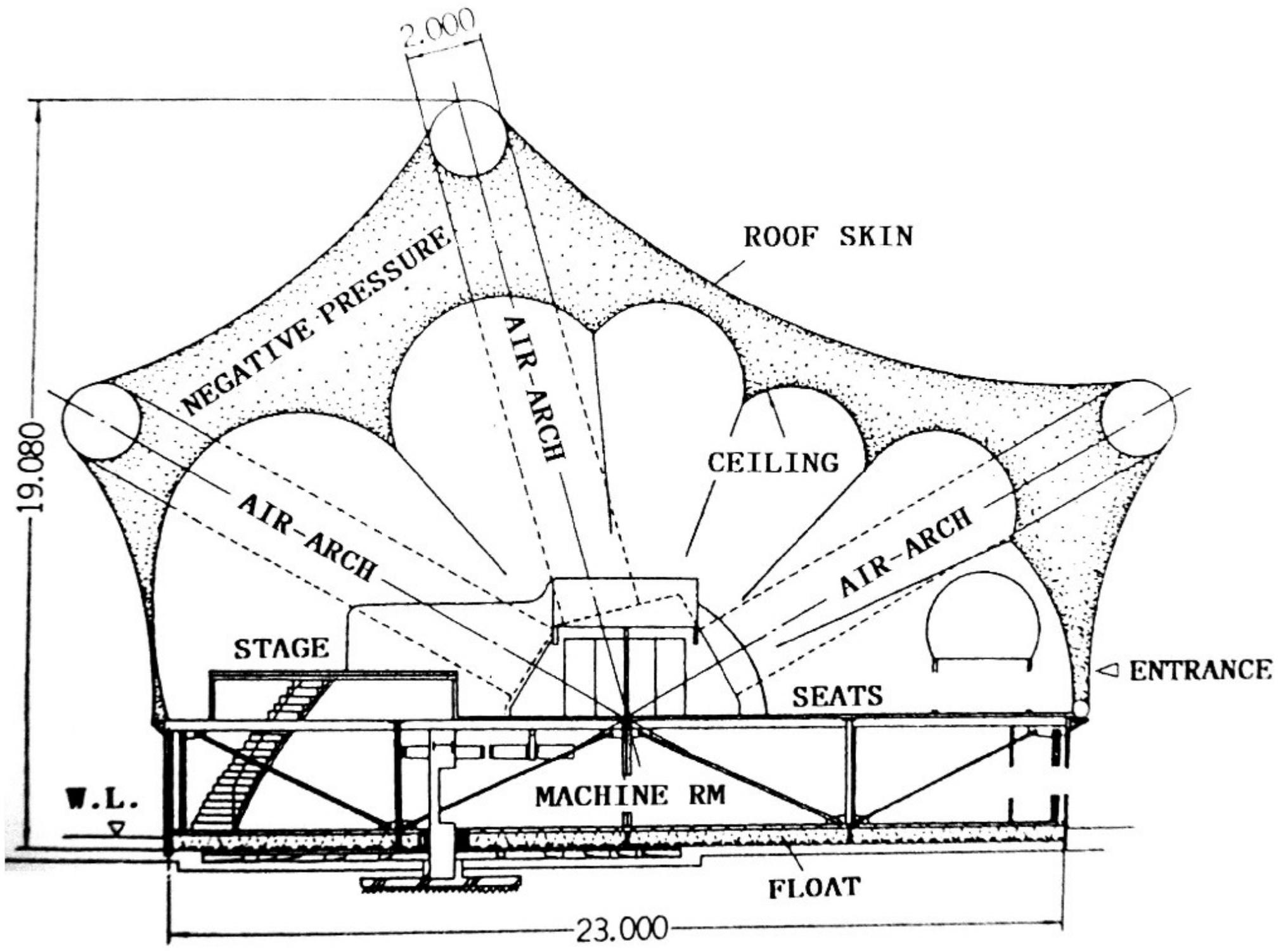
**Surfaces mécaniquement contraintes**

**Surfaces en tension : structures gonflables**

# Electric power pavillon Expo'70, Osaka, Ing. Kawaguchi

---





# De la double courbure inverse gonflable?

---

Anish Kapoor, Grand palais, Paris, 2010.



# Structures cinétiques...

---

Abri pneumatique rotatif conçu par Dominik Baumüller

(double membrane en polyéthylène:  
18 kg, diam.= 6 m).



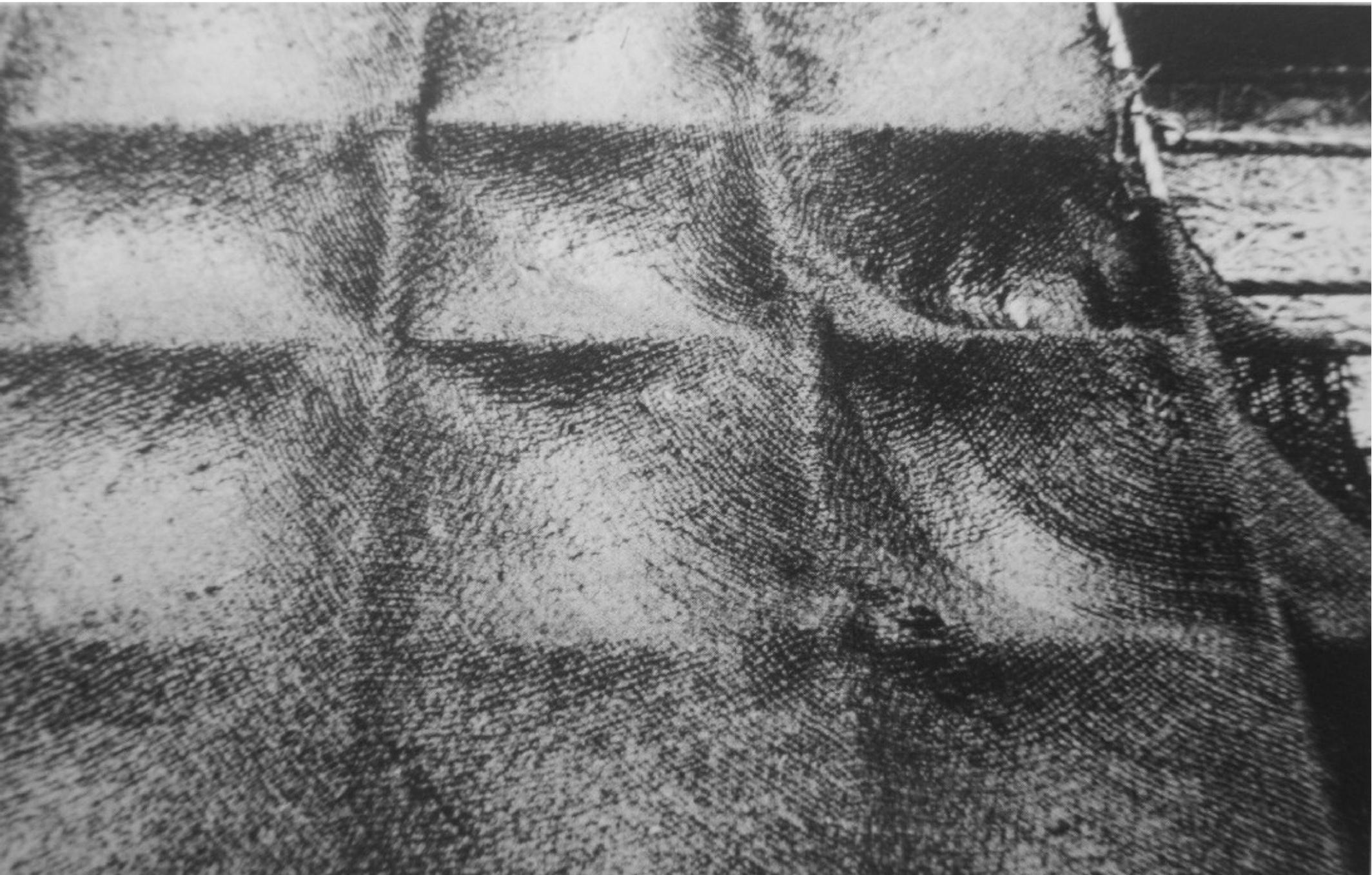
---

**Principes de génération de la géométrie 8**

**Surfaces mécaniquement contraintes**

**Surfaces en compression**

# La vision d'Heinz Isler





Station service BP Deitingen Sud (1968), 26x31m



# Freilichttheater Grotzingen (1977), 42 m portée

---



# Tennis de Crissier (1980-1985)

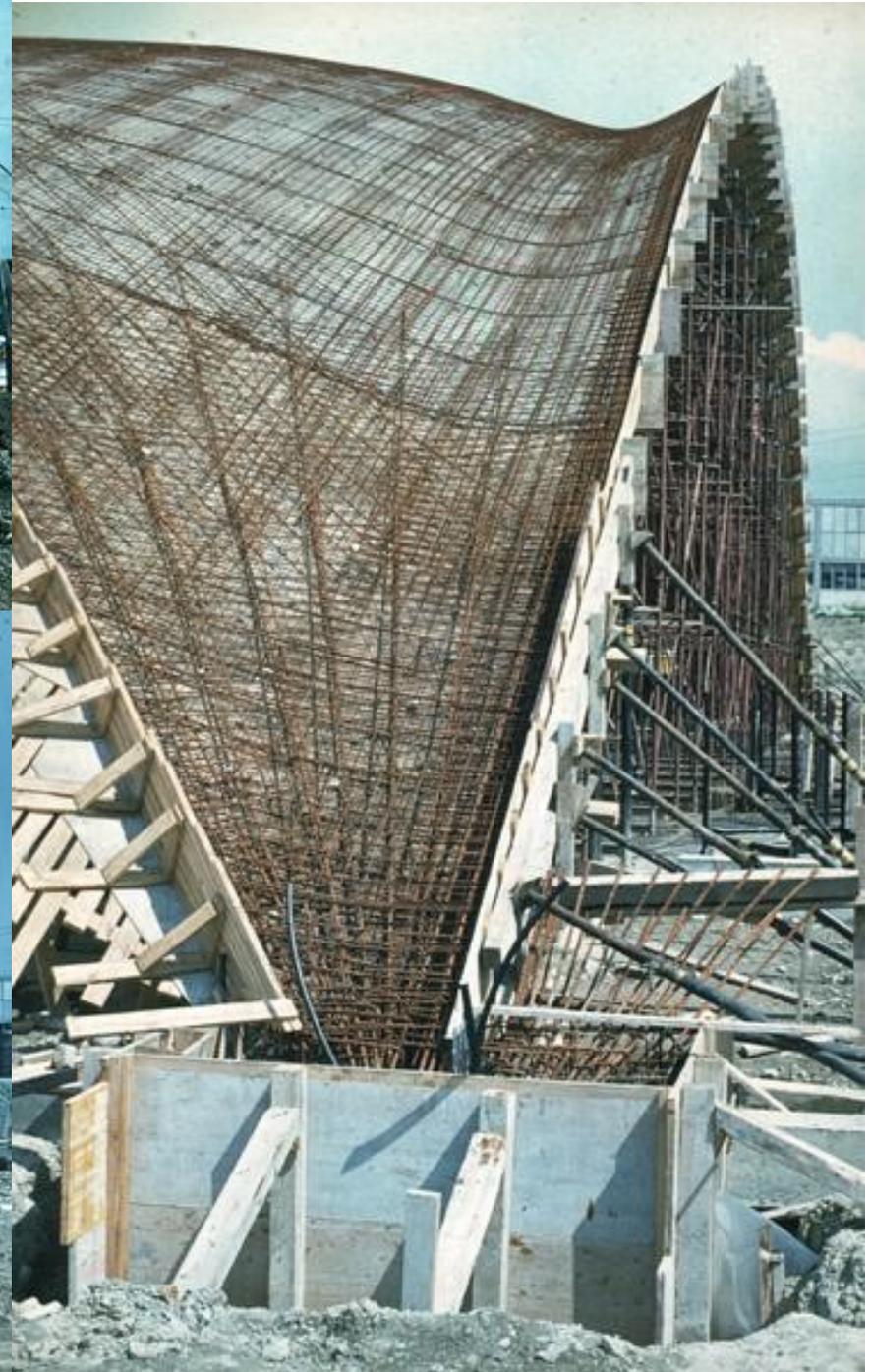
---





Tennis de Crissier, vue intérieure

# Tennis de Crissier, détails de construction



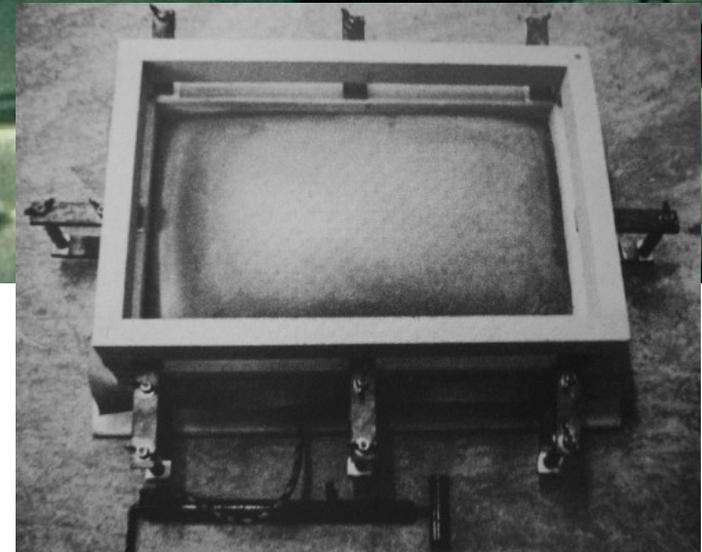
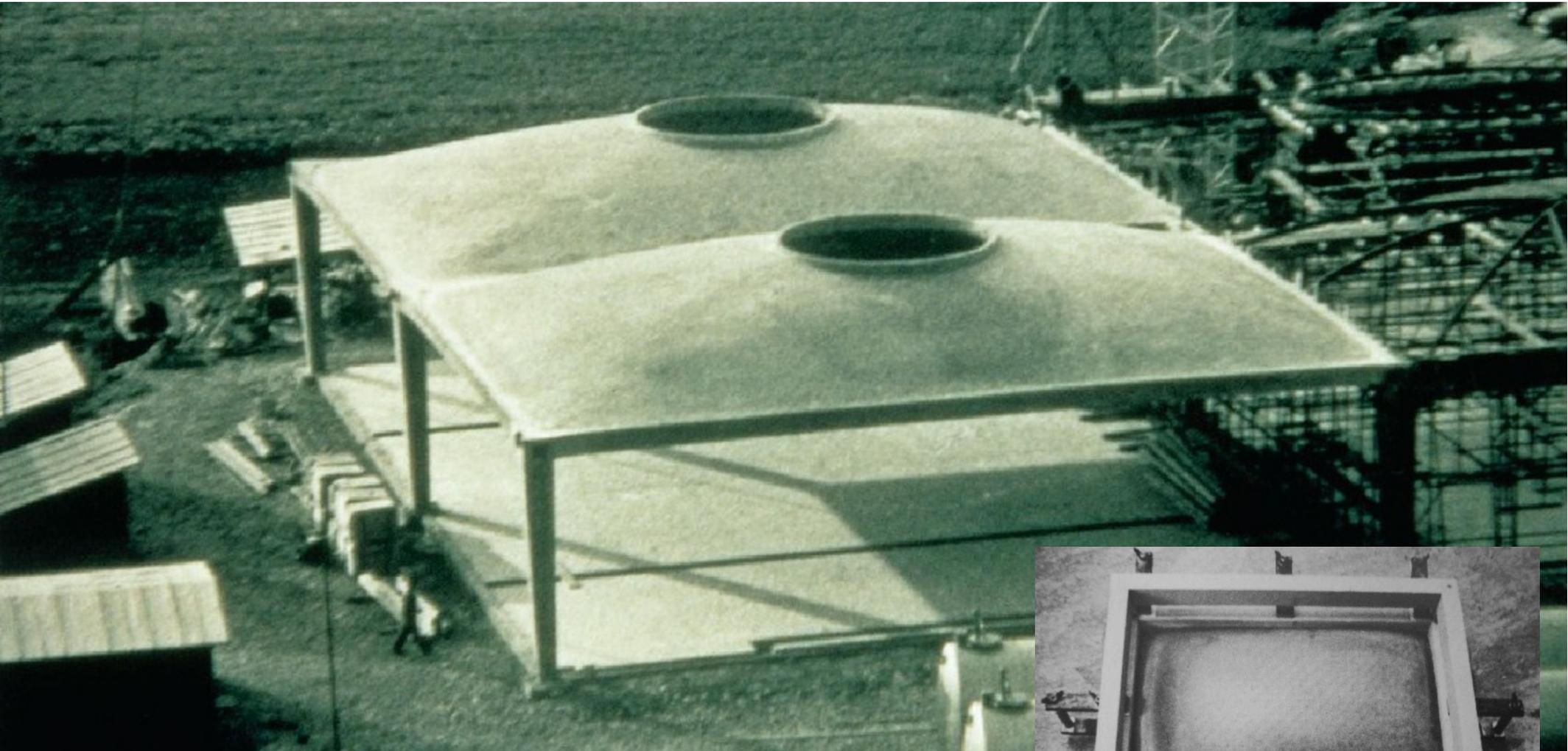
# Des expériences à faire chez soi...

---



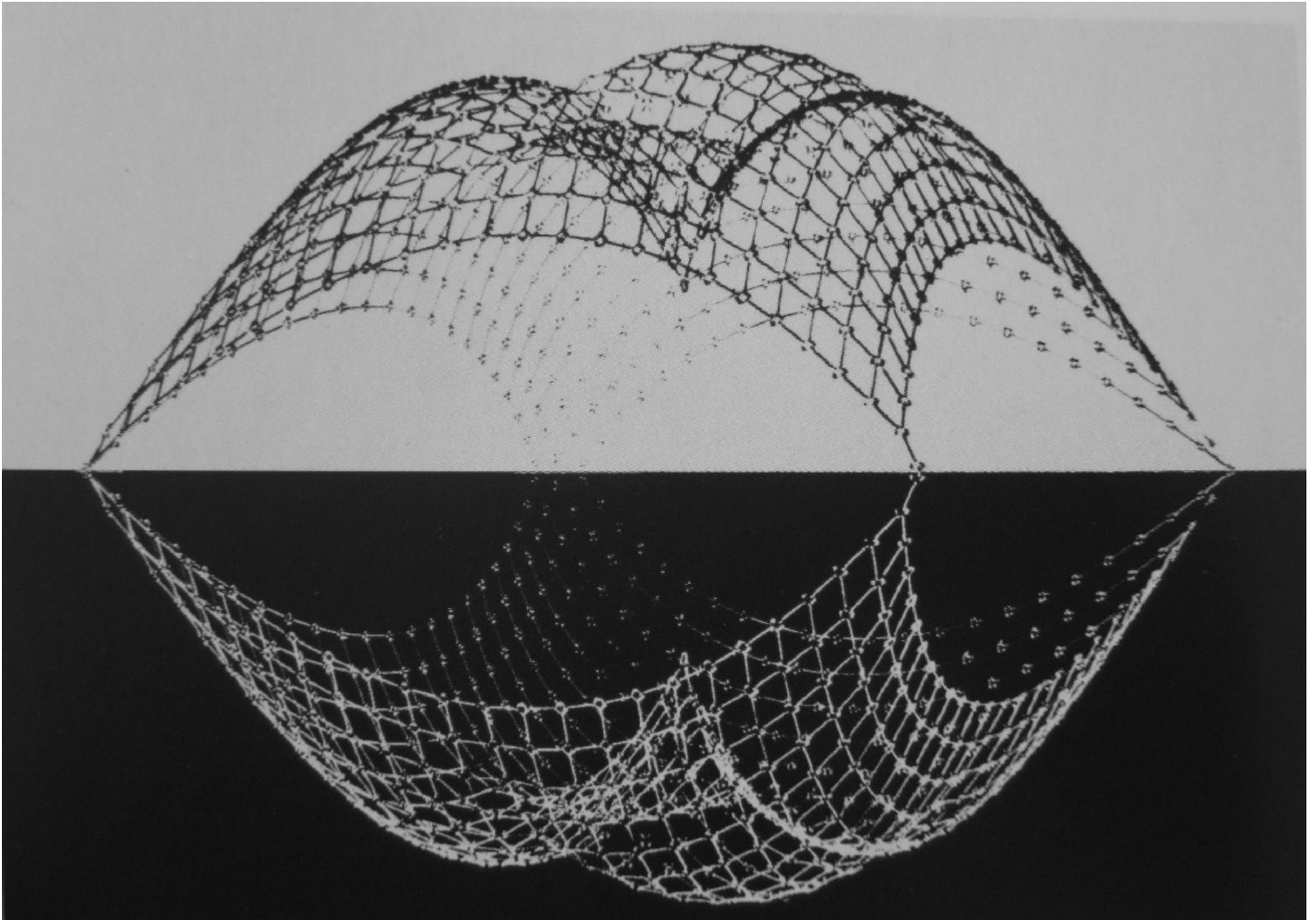
# Surfaces gonflables, 1956, Heinz Isler

---



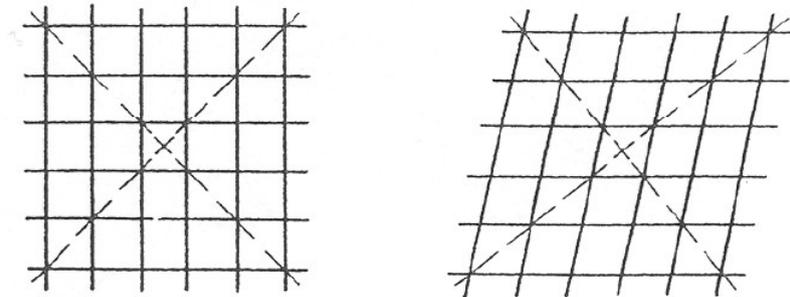
# Gridshell, Frei Otto, IL (années 60-70)

---



# Principe de construction

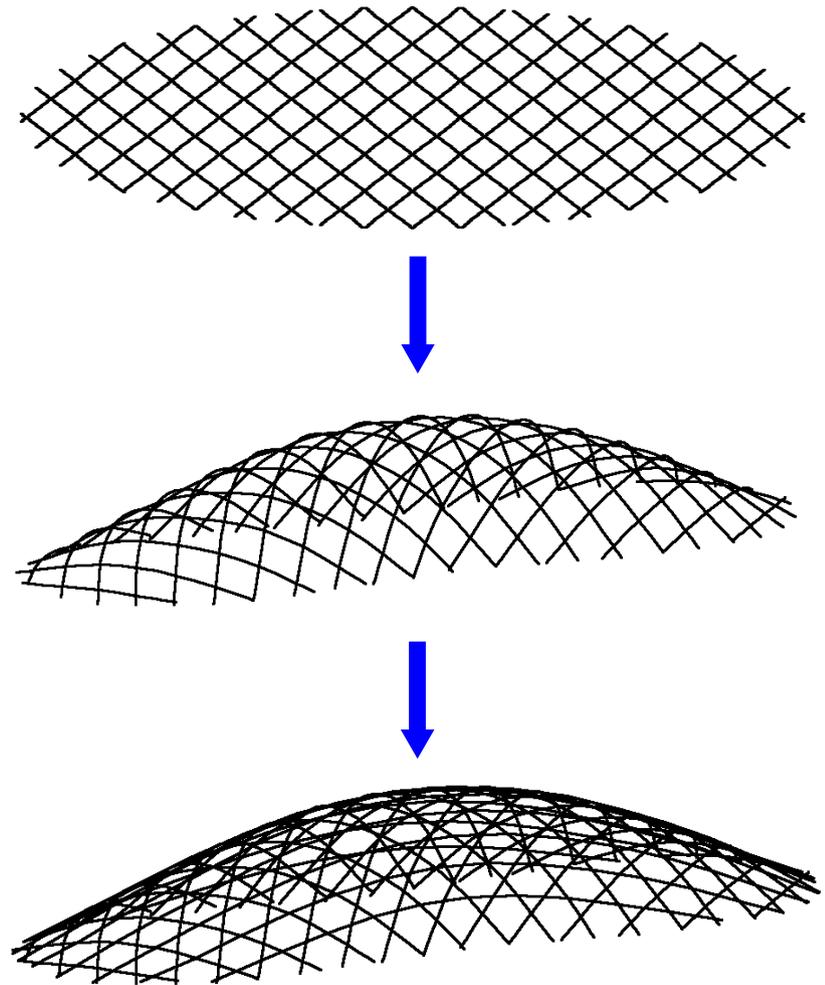
Grille orthogonale de poutres articulées entre elles;



=> Aucune rigidité en cisaillement pendant le montage;

Rigidification par contreventement de la forme finale;

=> comportement de type coque.



# Pavillon de l'exposition horticole de Mannheim, 1975

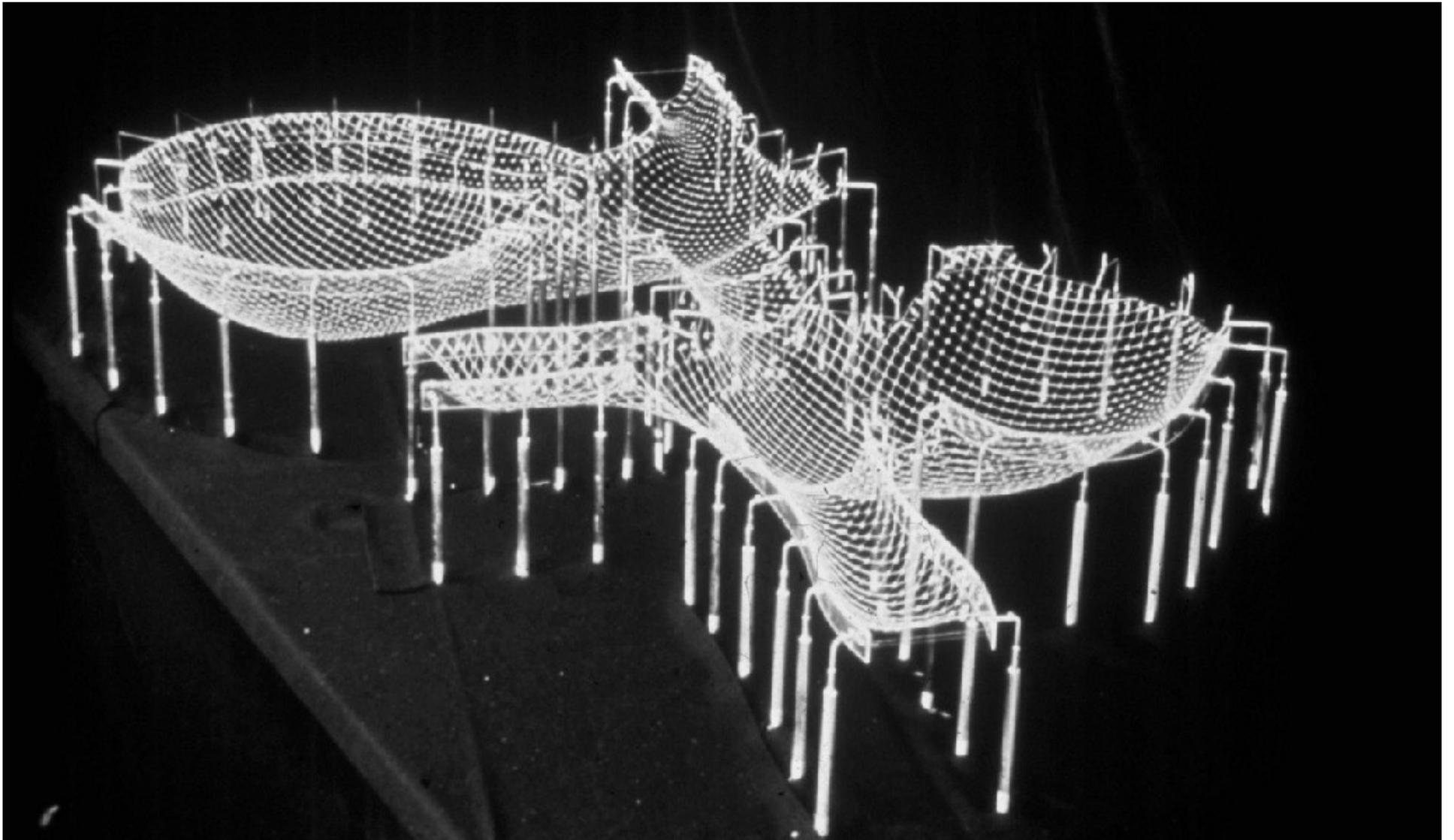
---

Architectes: Mutschler & Partners, Frei Otto,  
Ingénieur: Ed Happold (Ove Arup)



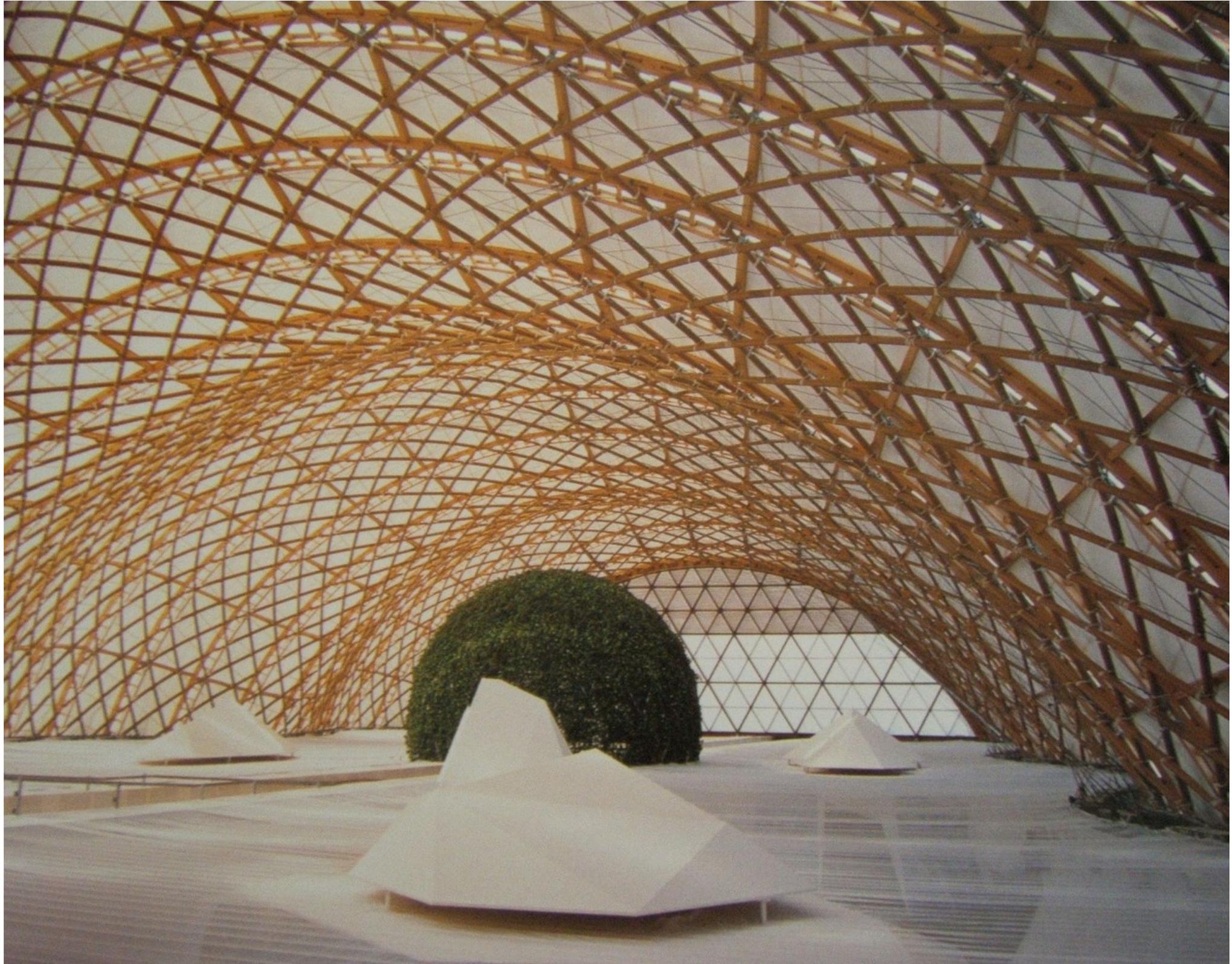
# Mannheim, maquette d'étude (IL)

---

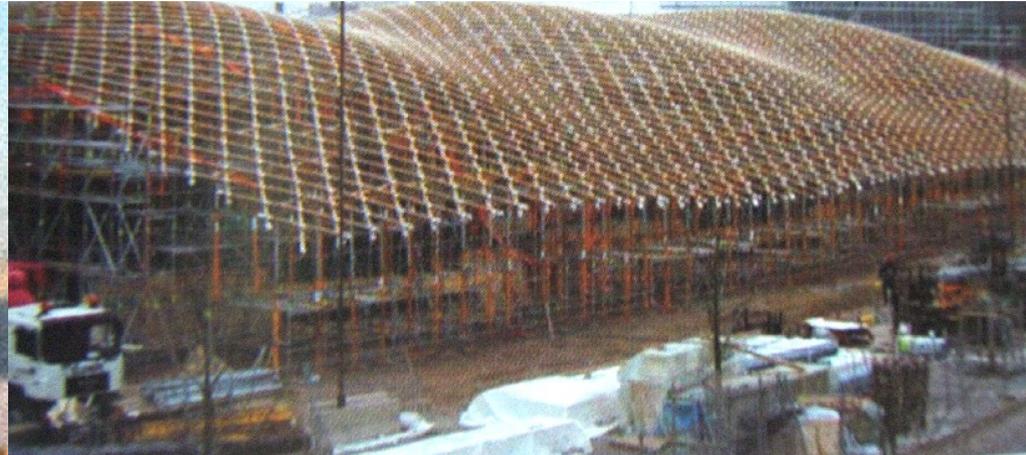


Pavillon japonais, Hanovre 2000,  
Shigeru Ban, Frei Otto, Buro Happold





# Pavillon japonais, Hanovre 2000, montage



# Gridshell en matériaux composites, ENPC, 2008

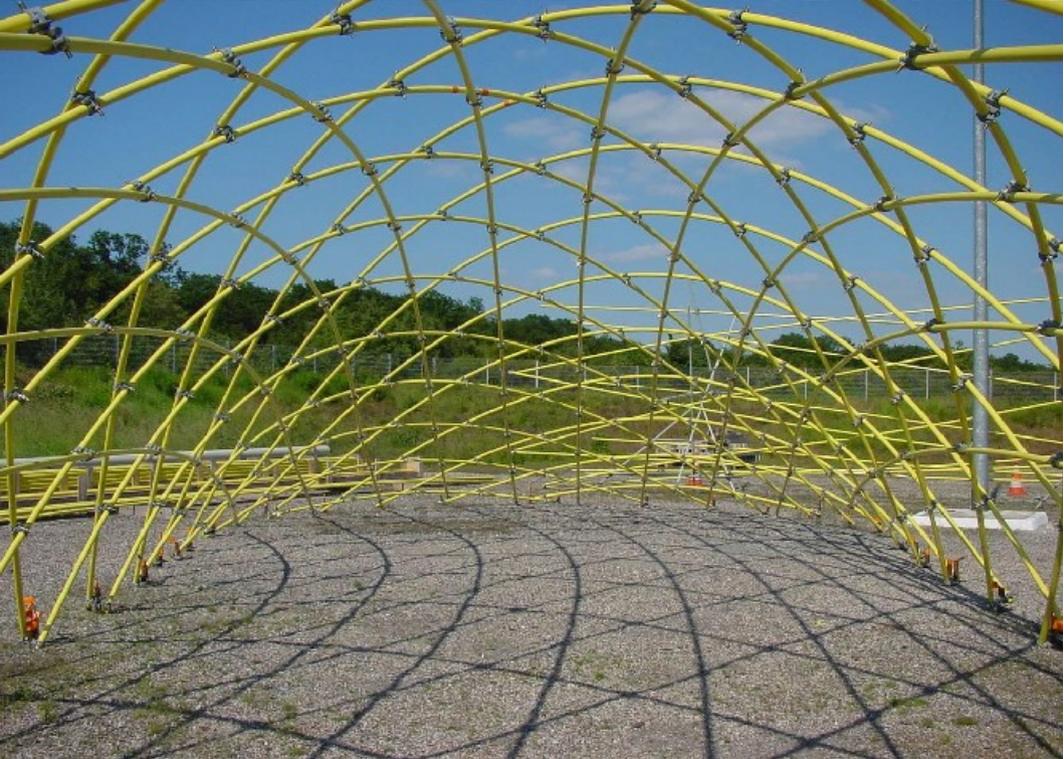
---



# Gridshell en matériaux composites, ENPC, 2007

---





---

## Conclusion

**« Moins il y a de calculs, meilleure est la conception. »  
(F. Candela)**

# Quelques points essentiels

---

- La géométrie est donnée par une surface dont les principes générateurs doivent être maîtrisés.
- La bonne marche du projet dépend de la prise en compte conjointe des contraintes de forme, de structure et d'enveloppe ou de technologie.
- Construire le courbe requiert des compromis.
- Le comportement de la structure dépend de la courbure.
- Les conditions aux bords doivent tenir compte de la nature de la structure (y compris les ouvertures).
- La structure est déterminée par les efforts secondaires générés par les conditions au bord et par le besoin de stabilité.

# Quelques points essentiels

---

- La géométrie est donnée par une surface dont les principes générateurs doivent être maîtrisés.
- La bonne marche du projet dépend de la prise en compte conjointe des contraintes de forme, de structure et d'enveloppe ou de technologie.
- Construire la courbe requiert des compromis.
- Le comportement de la structure dépend de la courbure.
- Les conditions aux bords doivent tenir compte de la nature de la structure (y compris les ouvertures).
- La structure est déterminée par les efforts secondaires générés par les conditions au bord et par le besoin de stabilité.

# Quelques références bibliographiques...

---

- Aesthetics and technology in building by Pier Luigi Nervi, the Charles Eliot Norton lectures, 1961-1962 (1965), ed. Harvard University Press – Cambridge Massachusetts.
- Felix Candela, Engineer, builder, structural artist, Maria E. Moreyra and David P. Billington (2009), Princeton University Art Museum, Yale University Press.
- Heinz Isler, Schalen, Ekkehard Ramm und Eberhard Schunck, 3ème édition (2002) VdF, Hochschule-Verlag an der ETH, Zürich.
- The art of structural Engineering, the work of Jörg Schlaich and his team, Alan Holgate, (1997) edition Axel Menges.
- Leicht und Weit, Light structures, Jörg Schlaich / Rudolf Bergerman, Anne Böggel editor, (2004) Prestel Verlag.
- Eladio Dieste, Innovation in Structural Art, Stanford Anderson editor, (2004) Princeton Architectural Press.
- Finding Form, toward an architecture of the minimal, Frei Otto and Bodo Rasch, 5ème édition (2006), edition Axel Menges.

# Quelques références bibliographiques...

---

- Seven structural engineers, The Felix Candela lecture, edited by Guy Nordenson, including Stanford Anderson, Cecil Balmond, Leslie Robertson, Heinz Isler, Mamoru Kawaguchi, Christian Menn, Jörg Schlaich and David Billington, (2008) The Museum of Modern Art, New York.
- Construire en Bois, Thomas Herzog, Julius Natterer, Roland Schweitzer, Michael Volz, Wolfgang Winter, 3ème édition (2007) Presses Polytechniques et universitaires romandes.
- Shigeru Ban, Matilda McQuaid (2003) ed. Phaidon.
- Informal, Cecil Balmond (2007) ed. Prestel.
- The tower and the bridge, the New Art of Structural Engineering, David P. Billington (1985), Princeton University Press.
- IL10 Gitterschalen, Gridshells, J. Hennicke, K. Matsushita, F. Otto et al., Institut für Leichte Flächentragwerke (IL), 1974.
- Tension structures: form and behaviour, Wanda J. Lewis, Thomas Telford, (2003) 201p.

# Quelques références bibliographiques...

---

- European Design Guide for Tensile Surface Structures, Brian Forster, Marijke Mollaert, (2004), Tensinet, Vrije Universiteit Brussel.
- Analyse des structures et milieux continus - Coques, François Frey et Marc-André Studer (2003) Traité de Génie Civil Vol. 5, Presses Polytechniques et universitaires romandes.
- Étude de structures élancées précontraintes en matériaux composites, application à la conception des gridshells, C. Douthe, Thèse de doctorat ENPC, 2007.
- Contribution à la conception et à la réalisation des morphologies non-standard, les p-formes comme outil, M. Bagneris, Thèse de doctorat Univ. Montpellier 2.
- Architectural geometry, H. Pottman, Bentley Institute Press, 2007.
- Flux Structures, Mutsuro Sasaki, Toto Publisher, 2005.
- Shell Structures for Architecture, S. Adriaenssens, P. Block, CJK Williams, ed Routledge 2014.

# Quelques sites internet utiles

---

- <http://www.explorations-architecturales.com>, L'univers des constructions en béton, Sabine Chardonnet & Robert Le Roy, ENSAPM.
- <http://www.structurae.de>, Nicolas Janberg, Galerie et base de données internationale d'ouvrages d'art.
- <http://www.mathcurve.com>, Encyclopédie des formes mathématiques remarquables, Nicolas Ferreol, 2011.
- <http://www.tensinet.com>, site de l'association TensiNet, base de données de projets et références techniques.