

Conception
des membranes architecturales
à double courbure négative

Marine Bagnéris

Introduction

I. Forme – Force *

II. Structure

III. Matériau

IV. Technologie

*«Membrane roofs are a pure expression of the inseparability of architectural form and structural expression »
Klaus-Michael Koch*

Conclusion

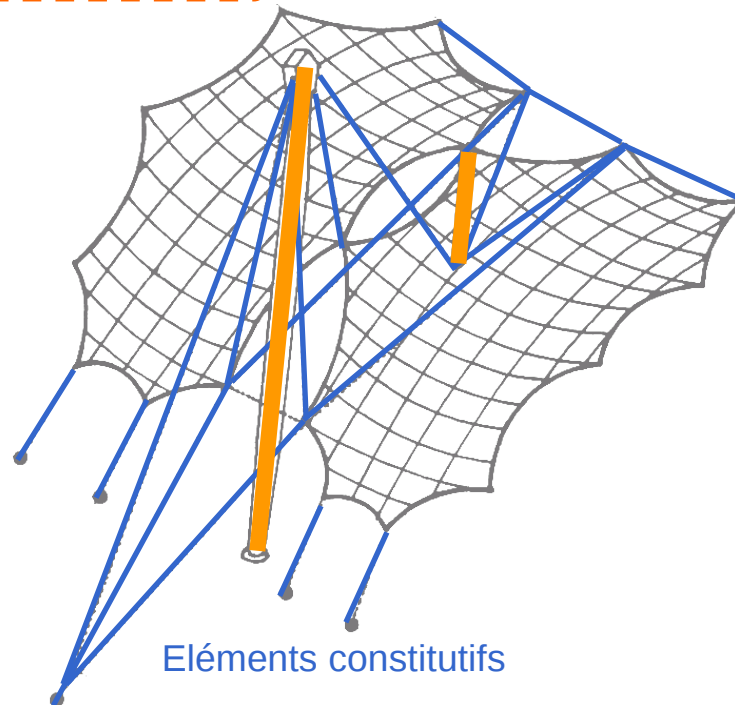
***Recommandations pour la conception des ouvrages permanents de couverture textile**, Annales des Bâtiments et Travaux Publics, n°4, septembre 1997 et modificatif 98.

Membranes architecturales

- ▶ Toile
- ▶ Éléments unidimensionnels flexibles
- ▶ Éléments de supports rigides

.....▶ traction

.....▶ compression / flexion



Éléments constitutifs

Aperçu historique

- ▶ Toile
 -▶ laine, cuir, coton...
- ▶ Éléments unidimensionnels flexibles
 -▶ cordes en fibres végétales, chanvre...
- ▶ Éléments de supports rigides
 -▶ poteaux, arcs en bois



Tente marocaine



Tente mauritanienne

Avantages et inconvénients

- ▶ abris (vent, soleil...)
- ▶ légèreté
- ▶ montage / démontage
- ▶ faible durabilité
- ▶ faible portée
- ▶ importante maintenance



premiers chapiteaux de cirque

Évolution des techniques

▶ Toile

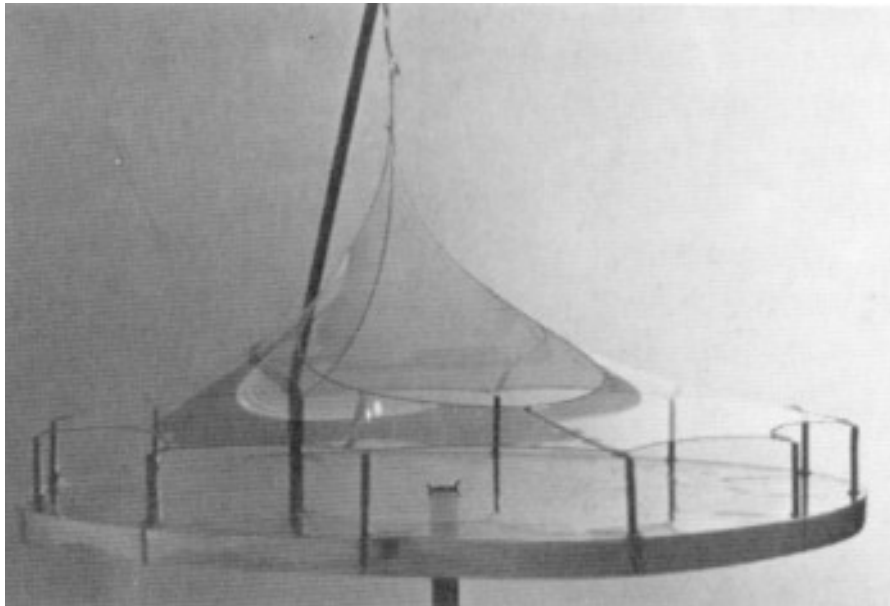
.....▶ ...

▶ Éléments unidimensionnels flexibles

.....▶ câbles acier haute résistance

▶ Éléments de supports rigides

.....▶ poteaux, arcs en acier, murs BA,...



Évolution des techniques

▶ Toile

.....▶ ...

▶ Éléments unidimensionnels flexibles

.....▶ câbles acier haute résistance

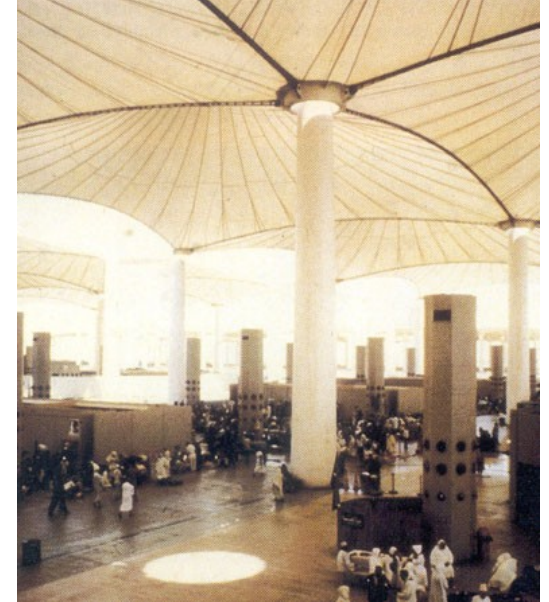
▶ Éléments de supports rigides

.....▶ poteaux, arcs en acier, murs BA,...



Évolution des techniques

- ▶ Toile fibres synthétiques enduites
- ▶ Éléments unidimensionnels flexibles Câbles acier haute résistance
- ▶ Éléments de supports rigides poteaux, arcs en acier, murs BA...



Haj Terminal – Geiger Berger Associates – Arabie Saoudite – 1982

Évolution des techniques

- ▶ Toile► fibres synthétiques enduites
- ▶ Éléments unidimensionnels flexibles► Câbles acier haute résistance
- ▶ Éléments de supports rigides► poteaux, arcs en acier, murs BA...



Hampshire Rose Bowl – Buro Happold – UK – 1997



Pusan Stadium – Corée du Sud – 2001

Évolution des techniques

- ▶ Toile► fibres synthétiques enduites
- ▶ Éléments unidimensionnels flexibles► Câbles acier haute résistance
- ▶ Éléments de supports rigides► poteaux, arcs en acier, murs BA...



© Architen Landrell Associates Ltd.

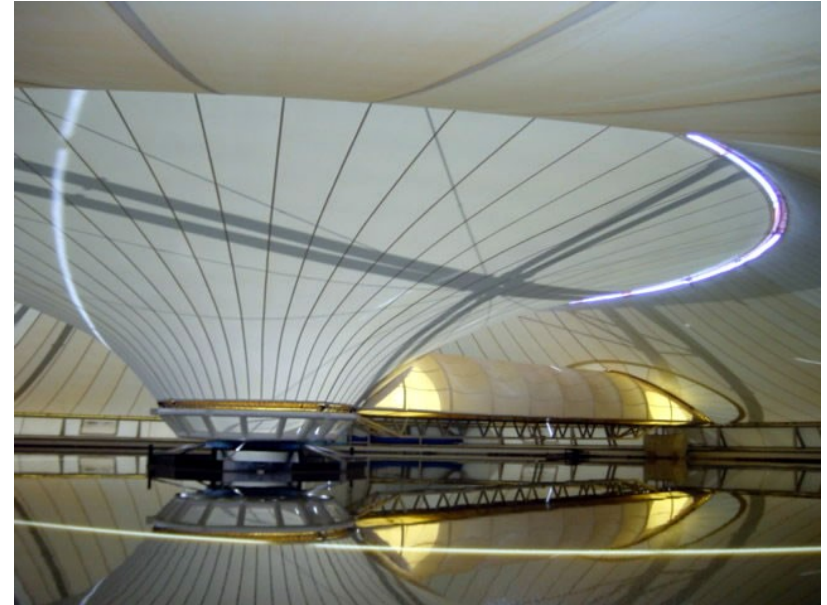


McArthur Glen Designer Outlet Village – R. Rogers – UK - 2000

Plashet Unity Bridge – UK – 2000

Évolution des techniques

- ▶ Toile fibres synthétiques enduites
- ▶ Éléments unidimensionnels flexibles Câbles acier haute résistance
- ▶ Éléments de supports rigides poteaux, arcs en acier, murs BA...



Bassin de décantation – Arcora – France – 2002

Évolution des techniques

- ▶ Toile► fibres synthétiques enduites
- ▶ Éléments unidimensionnels flexibles► Câbles acier haute résistance
- ▶ Éléments de supports rigides► poteaux, arcs en acier, murs BA...



Chene Park Amphithéâtre – USA – 1990 -2003



Skysong – USA - 2009

Avantages

- ▶ abris (vent, soleil...)
- ▶ légèreté
- ▶ montage / démontage
- ▶ grande durabilité
- ▶ grande portée
- ▶ peu de maintenance



Kongsberg Jazz Fest. – Norvège – 2006



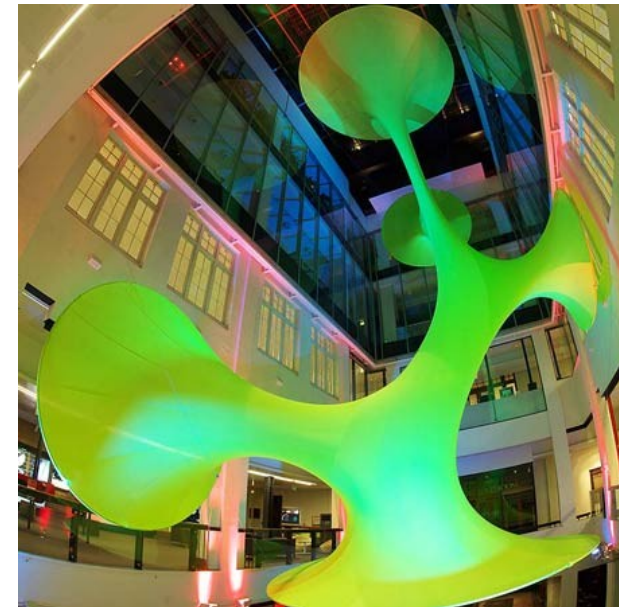
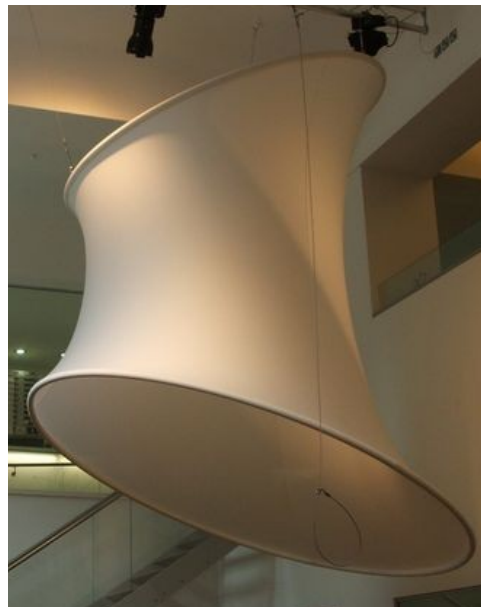
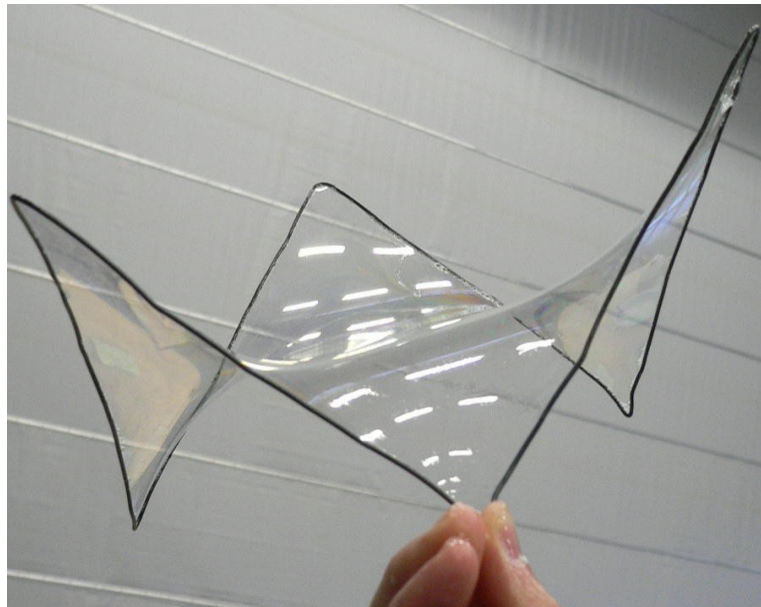
Antilles de Jonzac – France – 2002

I. Forme - Force

Recherche de forme

- ▶ conditions de bord
- ▶ précontrainte

.....▶ une forme à l'équilibre résultante



Couplage forme-force

Propriétés physique et géométrique

▶ Young (1805) et Laplace (1806) $\dots\dots\dots$ $P = \frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2}$

▶ film de savon (Frei Otto)

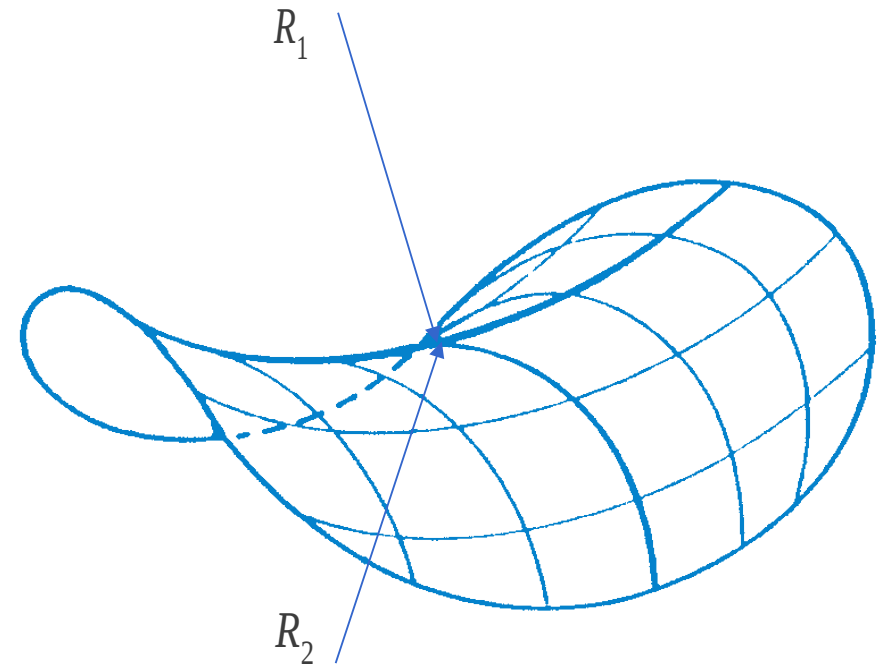
$$\left. \begin{array}{l} P=0 \\ T_1=T_2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = 0$$

$$\rho_1 = \frac{1}{R_1} \quad \text{et} \quad \rho_2 = \frac{1}{R_2} \quad \dots\dots\dots \rho_1 = -\rho_2$$

courbure gaussienne $K = \rho_1 \rho_2 \leq 0$



Surface à double courbure négative...ou plane mais ☹



Rayons de courbure principaux

Forme mécaniquement contrainte

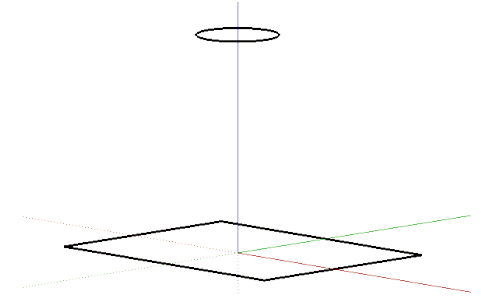
▶ On ne peut pas tout faire!

700km de câble contre 200km pour le stade olympique de Munich

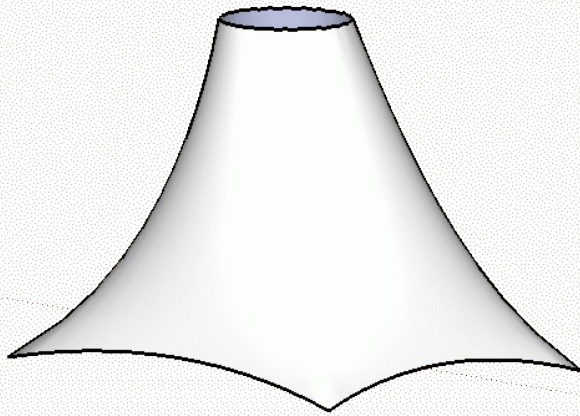


Millennium Dome – Richard Rogers & Buro Happold – UK – 1996

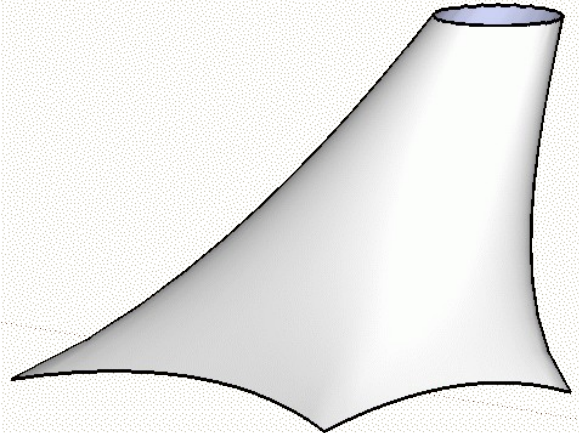
Modifications de la forme



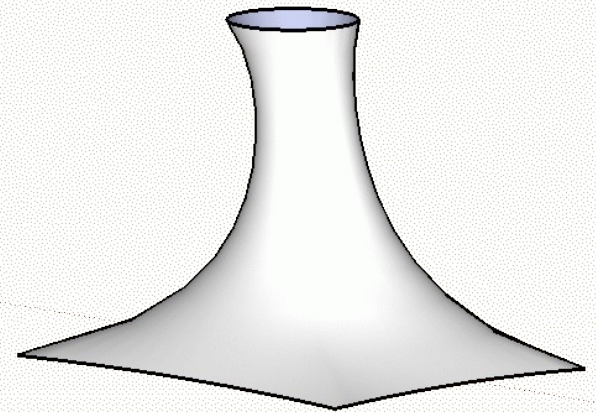
- ▶ Changement des conditions de bord▶ déplacement des ancrages...
- ▶ Modification de la précontrainte▶ non-uniformité



Film de savon



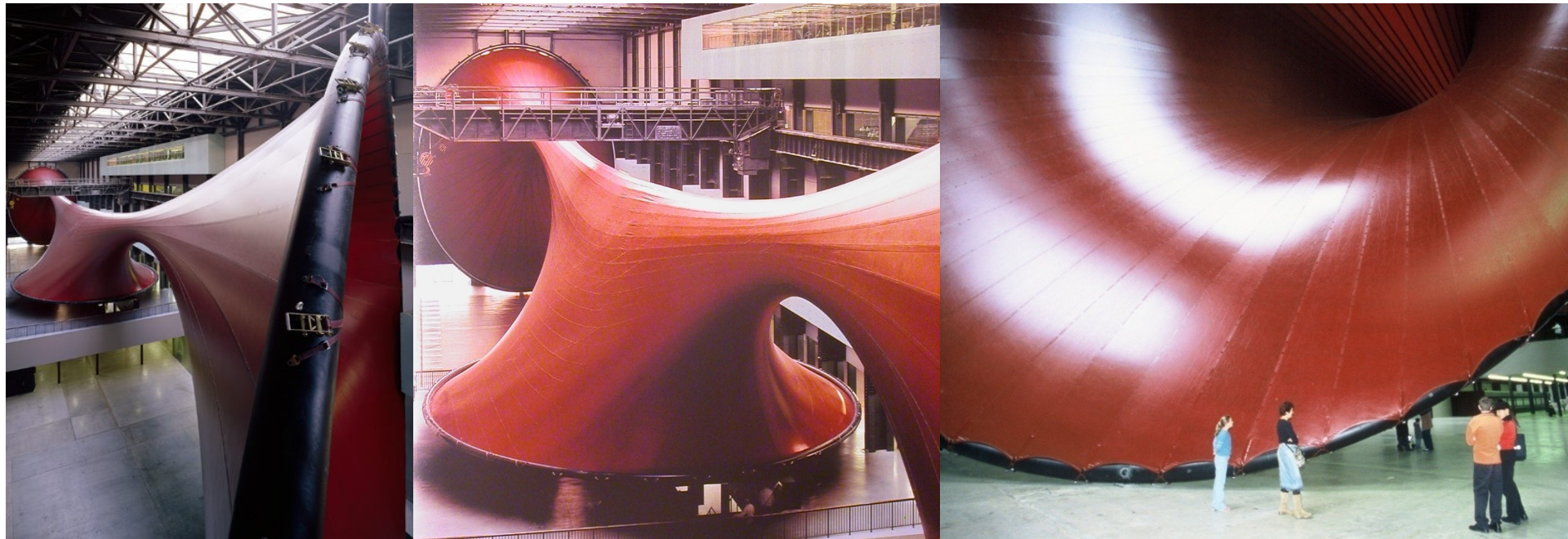
Déplacement du sommet



Précontrainte non-uniforme

Modifications de la forme

- ▶ Changement des conditions de bord▶ déplacement des ancrages...
- ▶ Modification de la précontrainte▶ non-uniformité



Marsyas – Anish Kapoor – UK – 2002

Modifications de la forme

- ▶ Changement des conditions de bord▶ déplacement des ancrages...
- ▶ Modification de la précontrainte▶ non-uniformité



Recommandations* pour le calcul

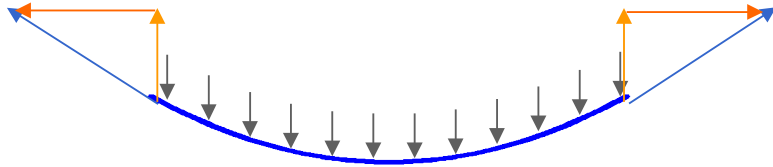
▶ Définition de la forme initiale

« *La forme des ouvrages sous prétension doit être définie au moyen d'une méthode appropriée* »

-▶ Densité de force (Archimedes France, Easy Allemagne, ForTen 3000 Italie, Tensys Grande-Bretagne,...)
-▶ Relaxation dynamique (Fablon Arup UK)
-▶ Méthodes des éléments finis (MCN USA, Japon)
-▶ Updated Reference Strategy (Membranes24, Allemagne) [Bletzinger]

***Recommandations pour la conception des ouvrages permanents de couverture textile**, Annales des Bâtiments et Travaux Publics, n°4, septembre 1997 et modificatif 98.

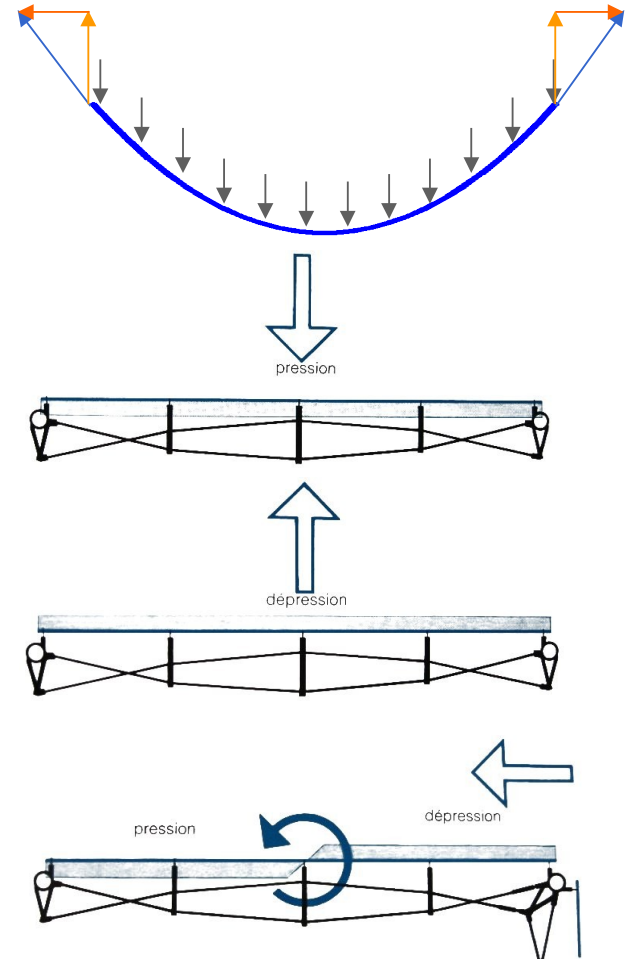
Intérêt de la courbure



Intérêt de la double courbure

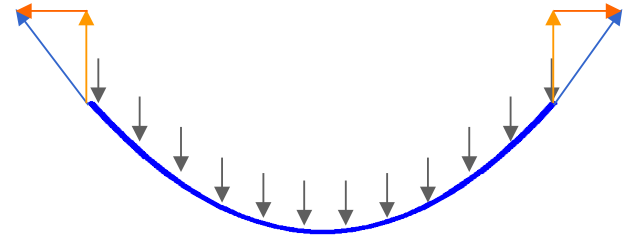
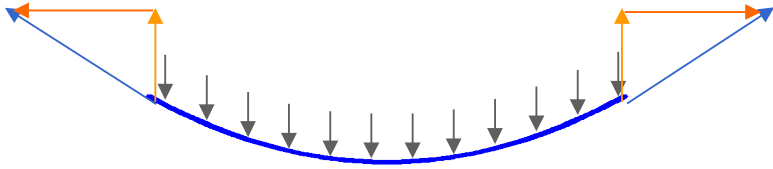


Serre de la Vilette – RFR – 1982/86

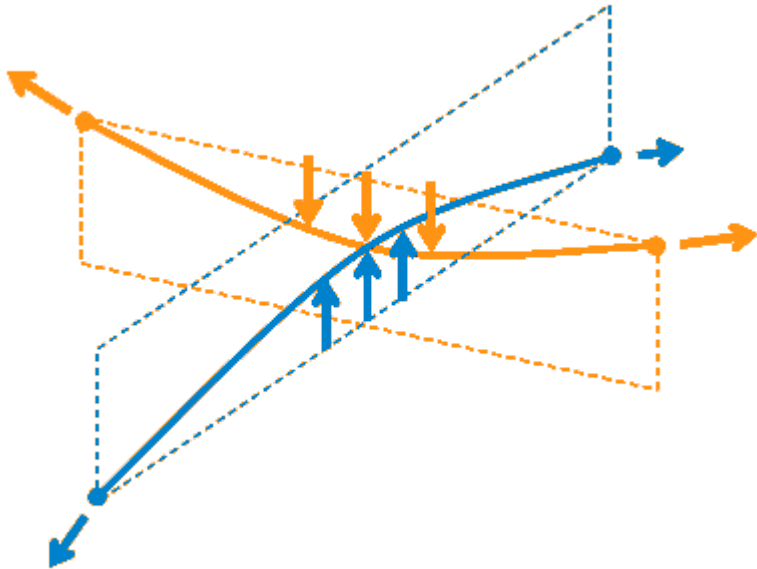


Chargements plans d'un raidisseur en câble

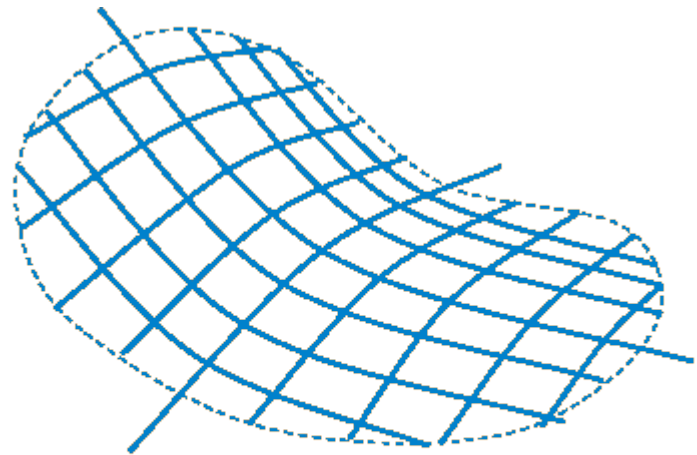
Intérêt de la courbure



Intérêt de la double courbure



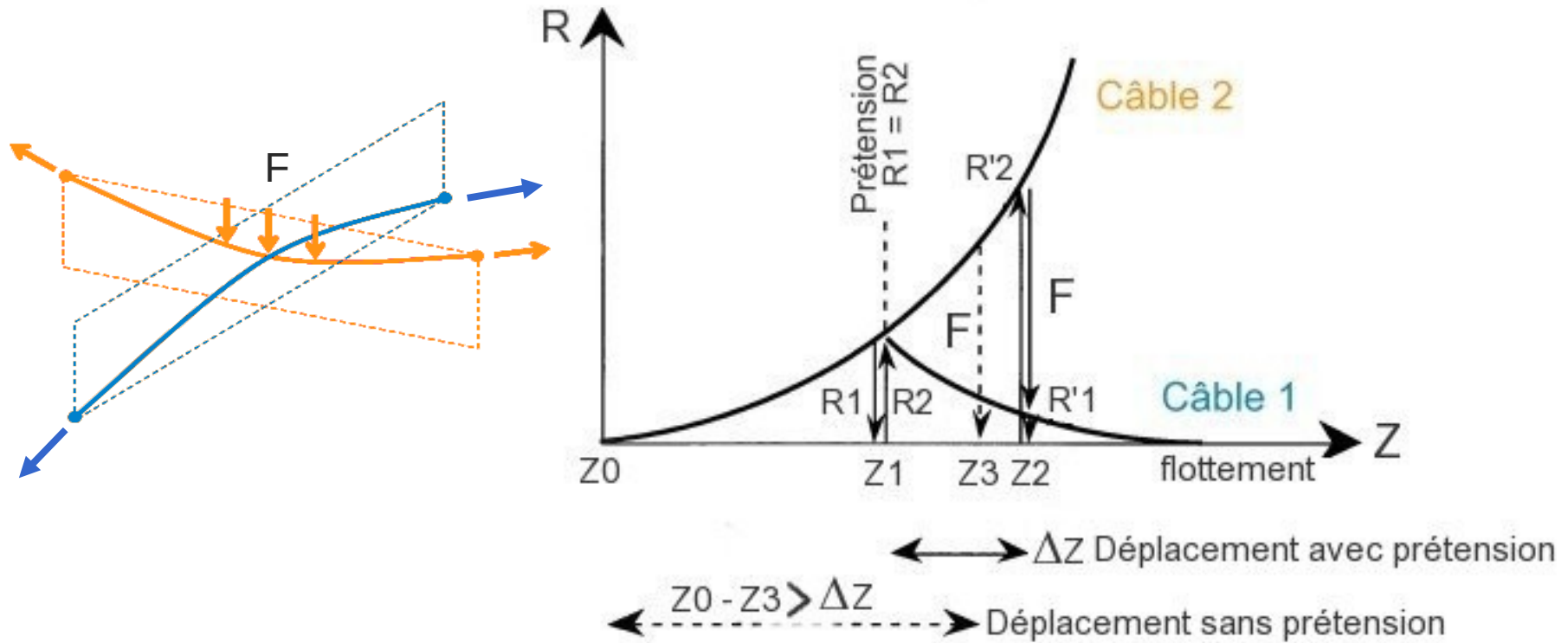
Bicâble



Membrane

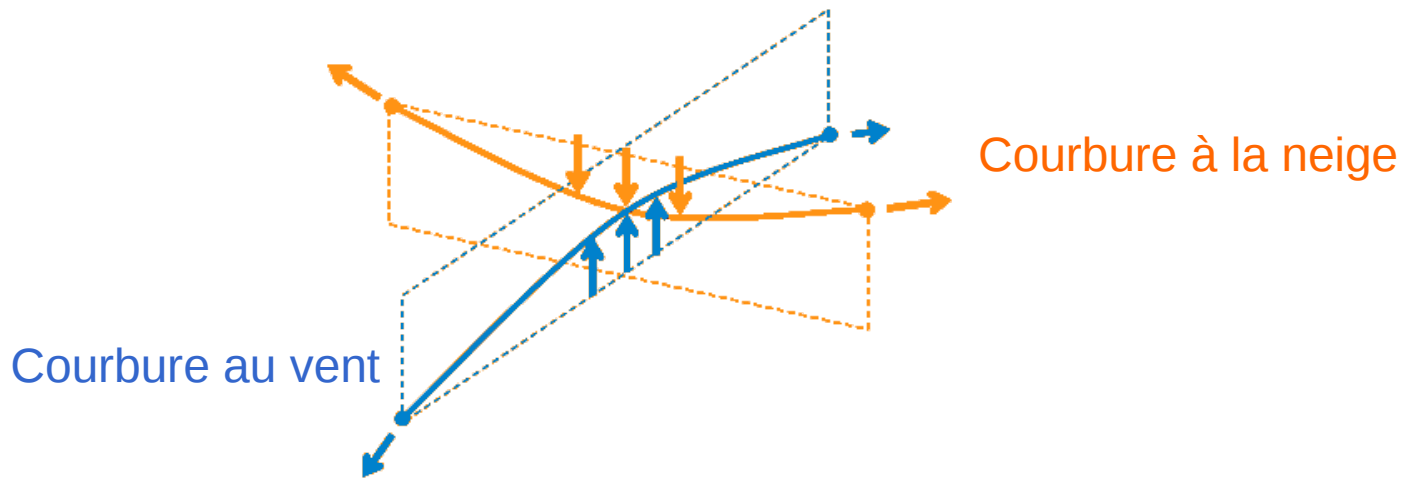
Intérêt de la **prétension**

► rigidification



Comportement sous charges climatiques

- ▶ Poids propre inférieur aux charges climatiques (Neige et Vent)



- ▶ Grands déplacements

.....▶ Originalité par rapport aux systèmes constructifs classiques

Recommandations* pour le calcul

▶ Hypothèses

-▶ non linéarité géométrique pour la toile
-▶ linéarité matérielle (sauf pour la découpe de toile)
-▶ déplacements de la structure porteuse

▶ Méthodes numériques adaptées

Si forme simple, $R < 20m$, $S < 250m^2$ et déplacements des supports négligeables▶ Méthodes des bandes indépendantes

Sinon▶ Méthodes des éléments finis (éléments câbles ou surfaciques)

-▶ actualisation de la géométrie
-▶ contrainte initiale (précontrainte)
-▶ détention de la membrane et/ou des câbles

Recommandations* pour le calcul

▶ Combinaisons des **actions** et coefficients de sécurité

.....▶ *équilibre sous prétension* de la toile seule

PP_{toile} + prétension

▶ Prétension

.....▶ 150 à 300 daN/m PVC/Polyester - 250 à 450 daN/m PTFE



Prétension par laçage

Recommandations* pour le calcul

▶ Combinaisons des **actions** et coefficients de sécurité

.....▶ *équilibre sous prétension* de la toile seule

PP_{toile} + prétension

.....▶ *Stabilité de forme*

Actions du vent et de la neige

Action du vent

▶ Surpression / Dépression



Action du vent sur une tente mauritanienne

Action du vent

▶ Pression de base

.....▶ NV 65 / Eurocode 1

.....▶ 60 à 120 daN/m²

.....▶ Règlement CTS

.....▶ 100km/h 47daN/m²

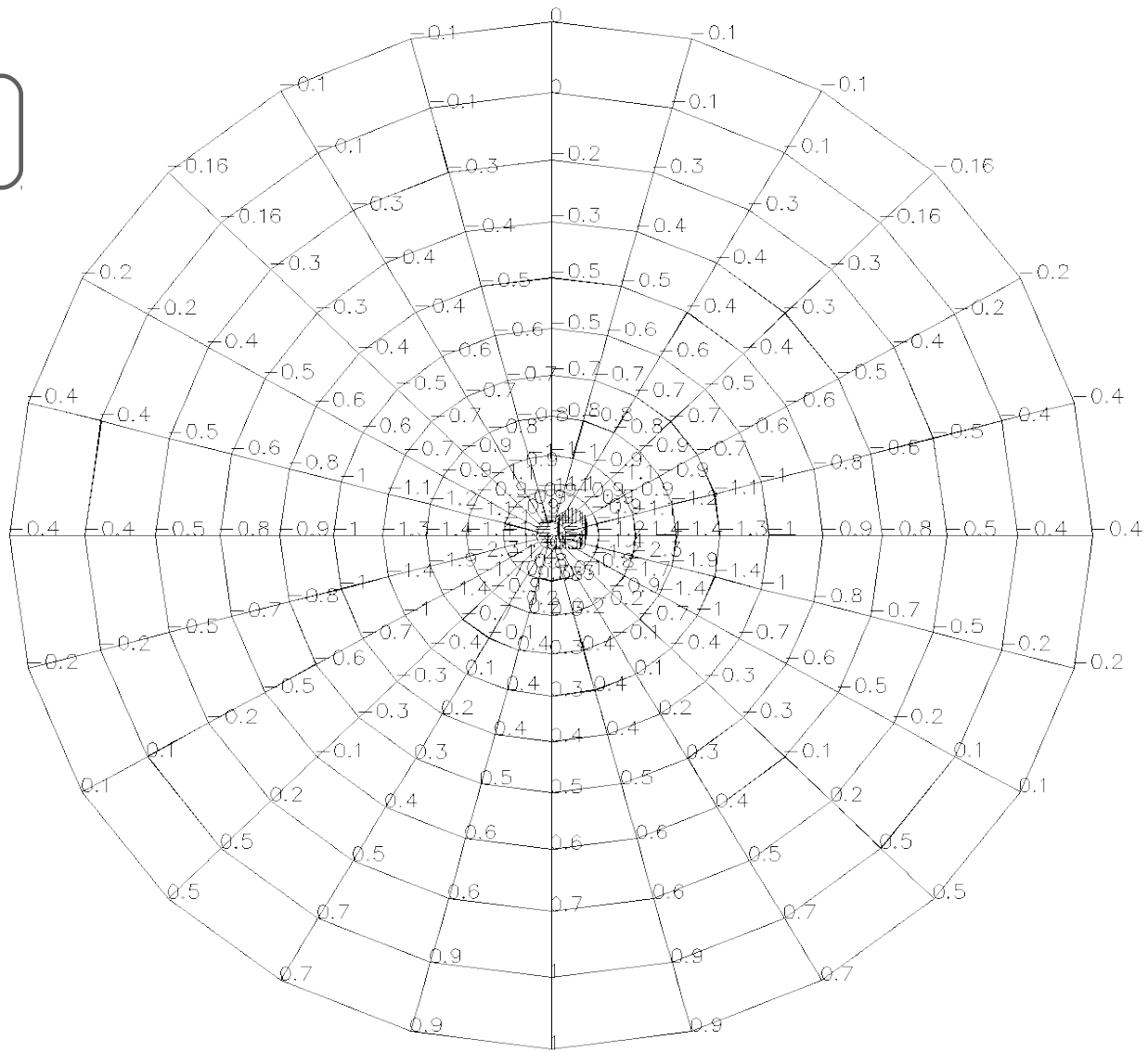
▶ Coefficients de pression

.....▶ NV 65 / Eurocode 1

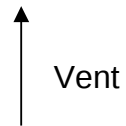
limité pour formes complexes

.....▶ Étude en soufflerie CEBTP

Action du vent



Coefficients de vent CEBTP



Action du vent

▶ Pression de base

.....▶ NV 65 / Eurocode 1

.....▶ 60 à 120 daN/m²

.....▶ Règlement CTS

.....▶ 100km/h 47daN/m²

▶ Coefficients de pression

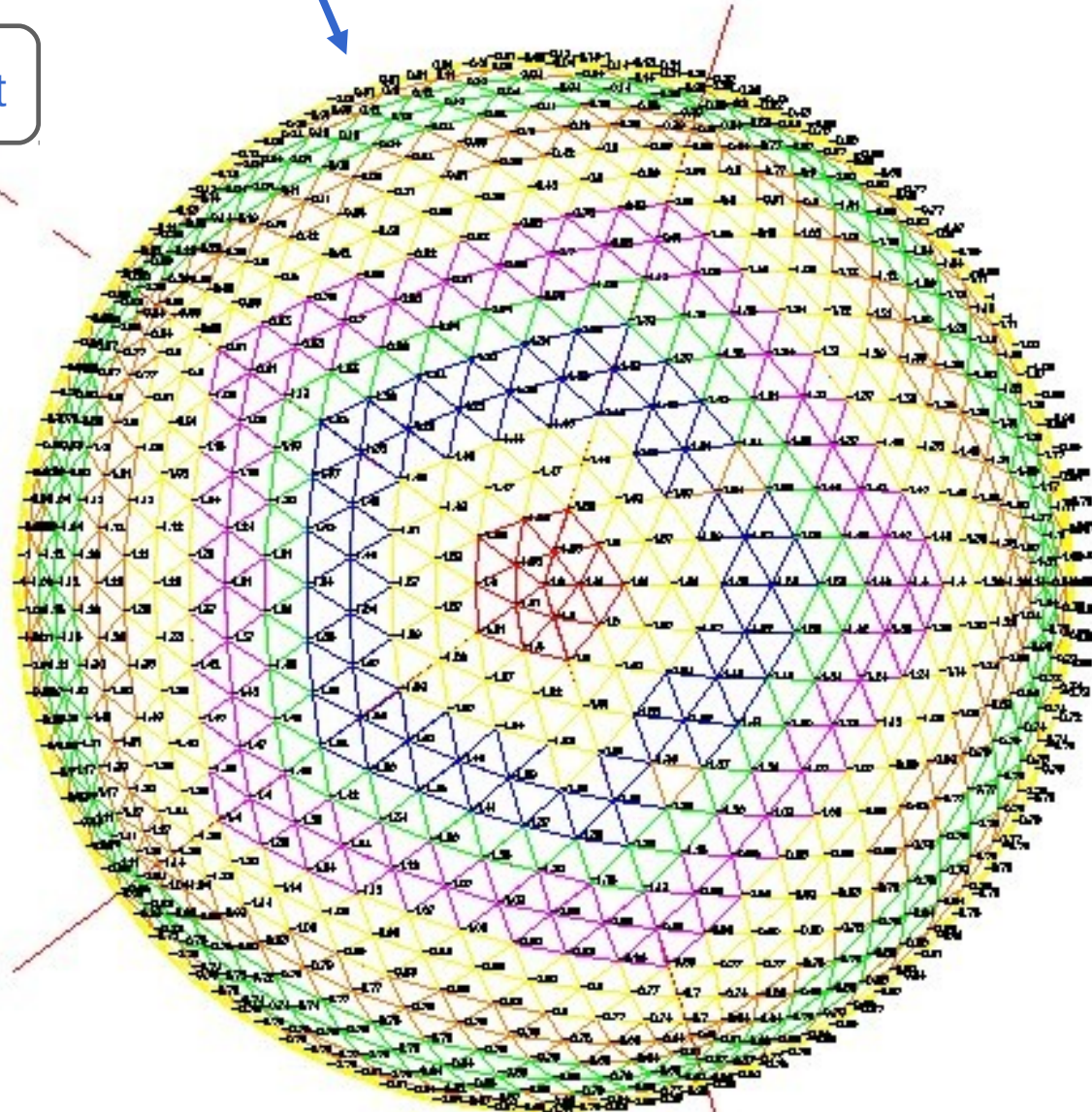
.....▶ NV 65 / Eurocode 1

limité pour formes complexes

.....▶ Etude en soufflerie CEBTP

.....▶ Simulation numérique

Action du vent



Coefficients de vent issus d'une étude aérodynamique numérique (Optiflow)

Action du vent



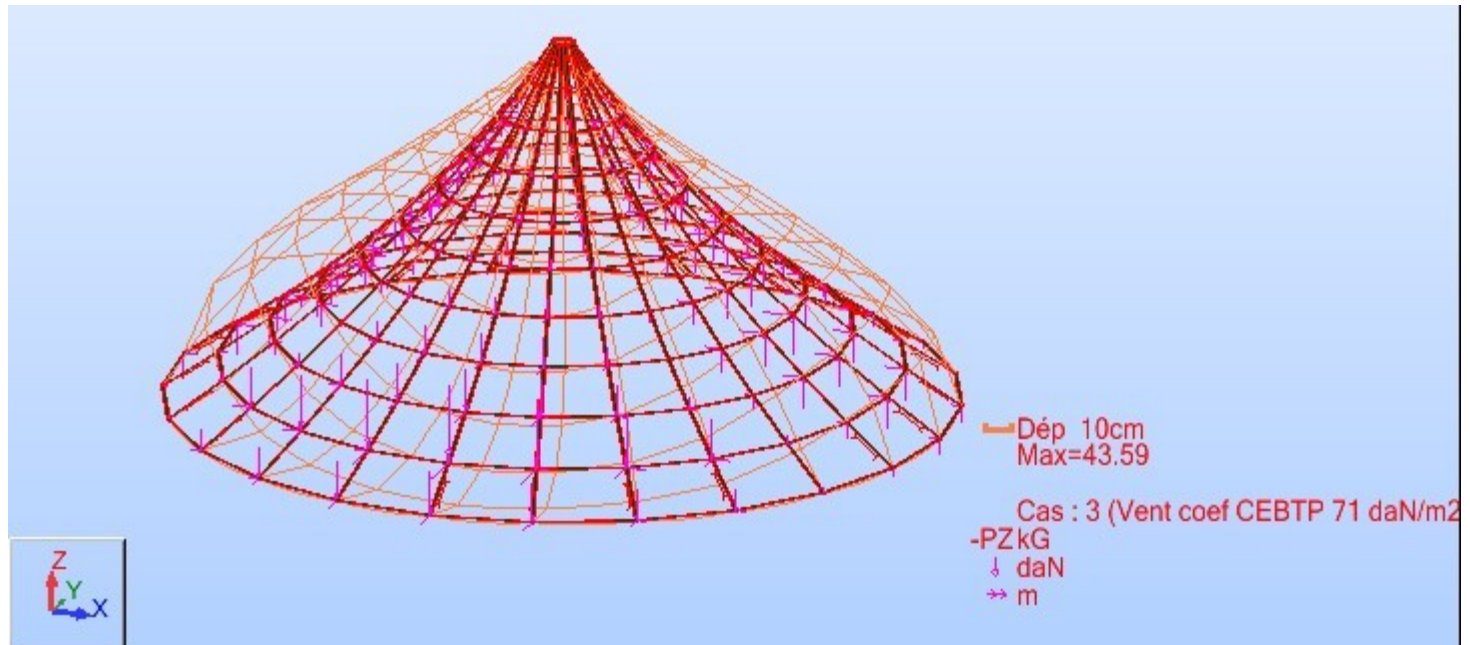
Bulle des Arts Sauts – Chapiteau gonflable – Abaca – 2003

Action du vent

▶ Pression locale du vent sur la membrane

.....▶ Portée par la normale à l'élément de surface considéré

$$P_L = C_p P_b S_{elem}$$

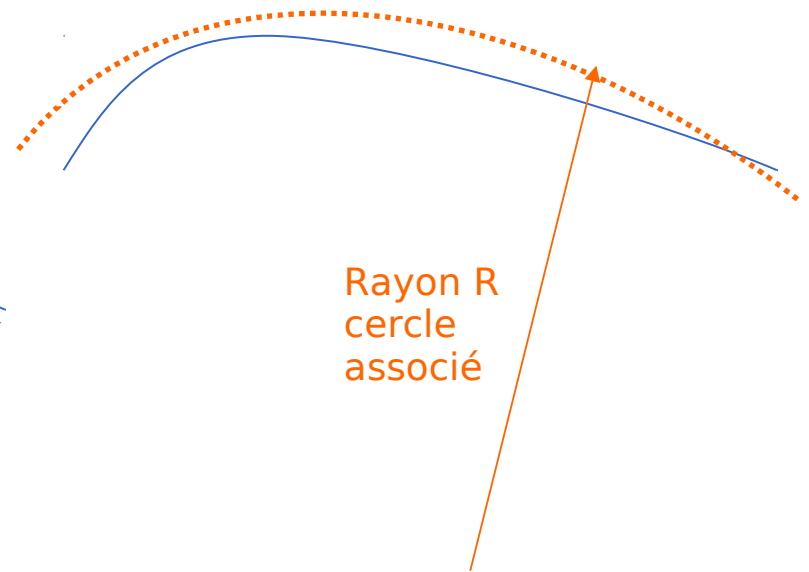
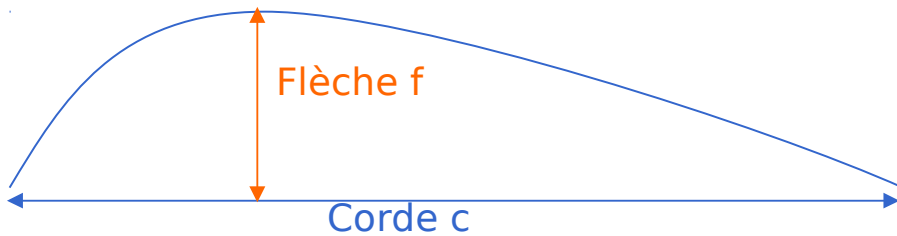


Vue d'un chargement de vent et déformée

Recommandations* pour la conception

▶ Éviter l'inversion de courbure

..... $\frac{c}{f} \leq 20$ et $R \leq 70 m$ $R \leq 2.5c$ ou $R \leq 50f$



Recommandations* pour la conception

▶ Éviter l'inversion de courbure

.....▶ $\frac{c}{f} \leq 20$ et $R \leq 70 m$ ▶ $R \leq 2.5c$ ou $R \leq 50f$

-▶ Sinon dispositifs stabilisateurs de forme (diaphragme ou câbles de vallée et d'arrête)



Aéroport Lyon Satolas

Recommandations* pour la conception

▶ Éviter l'inversion de courbure

.....▶ $\frac{c}{f} \leq 20$ et $R \leq 70 m$ ▶ $R \leq 2.5c$ ou $R \leq 50f$

.....▶ Sinon dispositifs stabilisateurs de forme (diaphragme ou câbles de vallée et d'arrêt)

▶ Éviter les effets dynamiques

.....▶ Rayon de courbure des ralingues $R_L < 25 m$

Recommandations* pour le calcul

▶ Stabilité de forme : combinaison des actions

« Pour les ouvrages de plus de 250m², ou de plus de 20m de rayon de courbure principal ou de forme complexe »

.....▶ Vérifier l'absence d'inversion de courbure pour la combinaison:

PP + prétension + vent normal

...Admise s'il peut être établi que leur répétition n'affecte pas, par fatigue, la durabilité de la toile et des attaches

Action de la neige

► Pression de base

.....► NV 65 / Eurocode 1

.....► 60 à 100 daN/m² - 30daN/m² mini

.....► Règlement CTS

.....► 10 daN/m²



Centre Pompidou Metz – Shigeru Ban - 2006-2010

Action de la neige

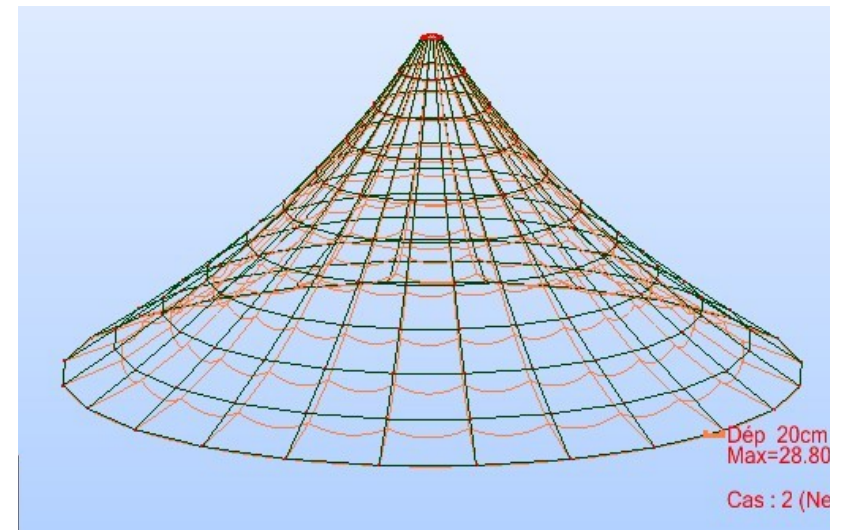
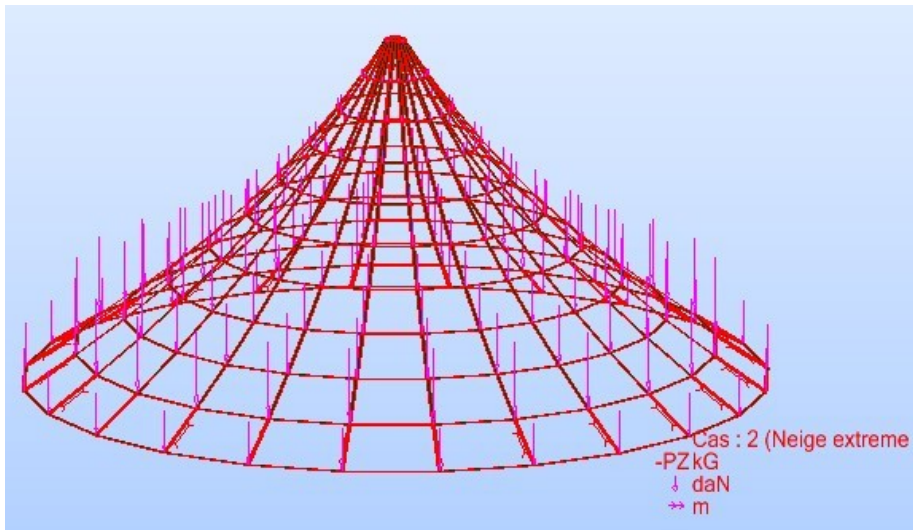
► Pression locale de la neige sur la membrane

.....► Portée par la normale à l'élément de surface projetée considéré

$$.....► P_L = P_b S_{elem_{proj}}$$

.....► Redistribution – enlèvement- Accumulation

$$.....► P_L = C_n P_b S_{elem_{proj}}$$



Recommandations* pour la conception

▶ Éviter la formation de poche d'eau

.....▶ Pente minimum en rive : $12^\circ = 20\%$

.....▶ Limitation sur les rayons de courbure idem

$$\frac{c}{f} \leq 20 \quad \text{et} \quad R \leq 70m \quad \text{.....} \rightarrow \quad R \leq 2.5c \quad \text{ou} \quad R \leq 50f$$

Recommandations* pour le calcul

▶ Stabilité de forme : **combinaison des actions**

« Pour les ouvrages de plus de 250m², ou de plus de 20m de rayon de courbure principal ou de forme complexe »

-▶ Vérifier l'absence d'inversion de courbure pour:
PP + prétension + neige normal
-▶ Vérifier l'absence de poches d'eau + que les zones détendues ne dépassent pas 20% de la surface totale pour:
PP + prétension + neige extrême

Recommandations* pour le calcul

- ▶ Combinaisons des **actions** et coefficients de sécurité
 -▶ *équilibre sous prétension* de la toile seule
PP_{toile} + prétension
 -▶ *Stabilité de forme*
Actions du vent et de la neige
 -▶ *Tensions de calcul et dimensionnement de la membrane*
se référer aux règles propres des matériaux de la structure porteuse
- ▶ Dimensionnement de la membrane
 -▶ **$T_c < T_d$**
 -▶ **T_d = Tension de dimensionnement différente si**
zone courante ou zone de fixation à l'accastillage

Recommandations* pour le calcul

► Tension de dimensionnement en zone courante

$$\dots \rightarrow T_d = \frac{k_q \cdot k_e \cdot T_{rm}}{\gamma_t}$$

T_{rm} résistance moyenne uni axiale en chaîne ou en trame

k_q facteur de qualité de la membrane (toile et soudure) $\dots \rightarrow$ 1 si ISO 9002
0.8 sinon

k_e facteur d'échelle $\dots \rightarrow$ 1 pour surface < 50m²
0.9 pour 50 < surface < 250 m²
0.8 pour 250 < surface < 500 m²

γ_t coefficient de sécurité de pollution $\dots \rightarrow$ 4 normale
4.5 forte

Coefficient de sécurité global ~ 5 à 7

Recommandations* pour le calcul

▶ Tension de dimensionnement en zone d'attache

$$\dots \rightarrow T_{d_{loc}} = \frac{k_q \cdot n_{eff} \cdot T_{rm}}{\gamma_{t_{loc}}}$$

n_{eff} nombre de plis efficaces en cas de renforts $\dots \rightarrow$

1.9 pour 2 plis
2.6 pour 3 plis
3.1 pour 4 plis
3.4 pour 5 plis

$\gamma_{t_{loc}}$ coefficient local de sécurité $\dots \rightarrow$ 5



Action de la neige



Centre Pompidou Metz
Shigeru Ban - 2006-2010

Action de la neige



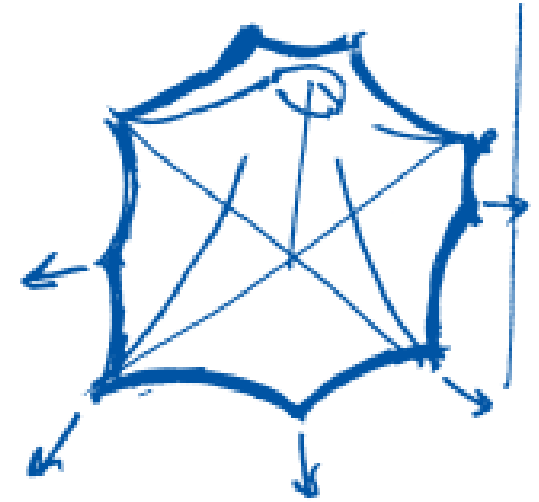
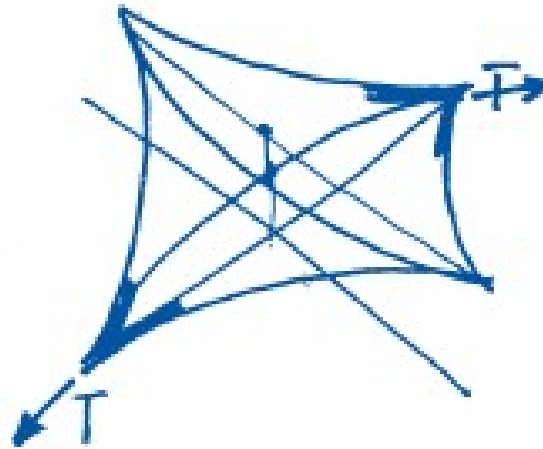
Recommandations* pour le calcul

- ▶ Dimensionnement des accastillages
 -▶ acier : 2 x charge de rupture expérimentale
 -▶ textile : 2.5 x charge de rupture expérimentale

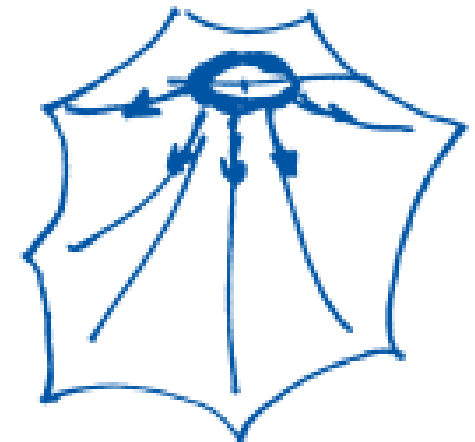
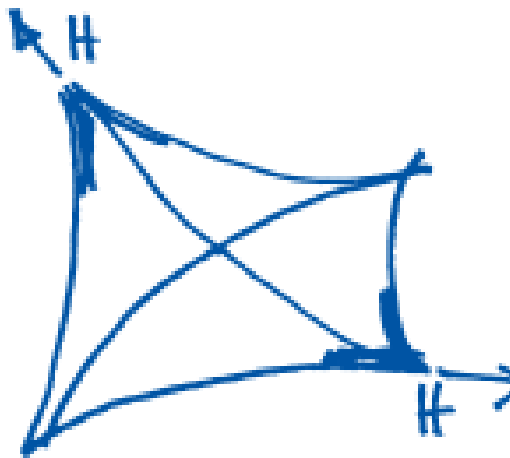
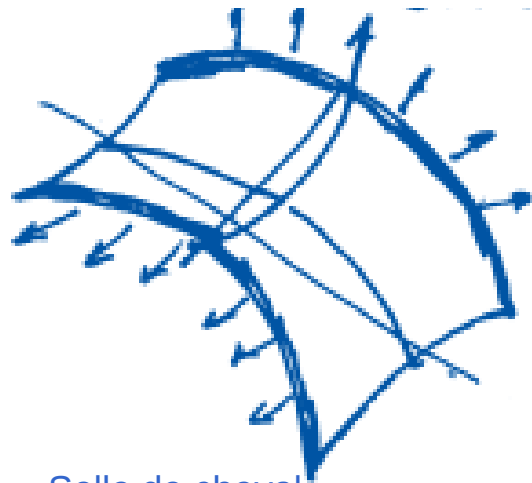
- ▶ Dimensionnement de la structure porteuse
 -▶ codes de calculs propres

- ▶ Dimensionnement des ancrages
 -▶ code de calculs propre

Action du vent



Action de la neige



Selle de cheval

PH

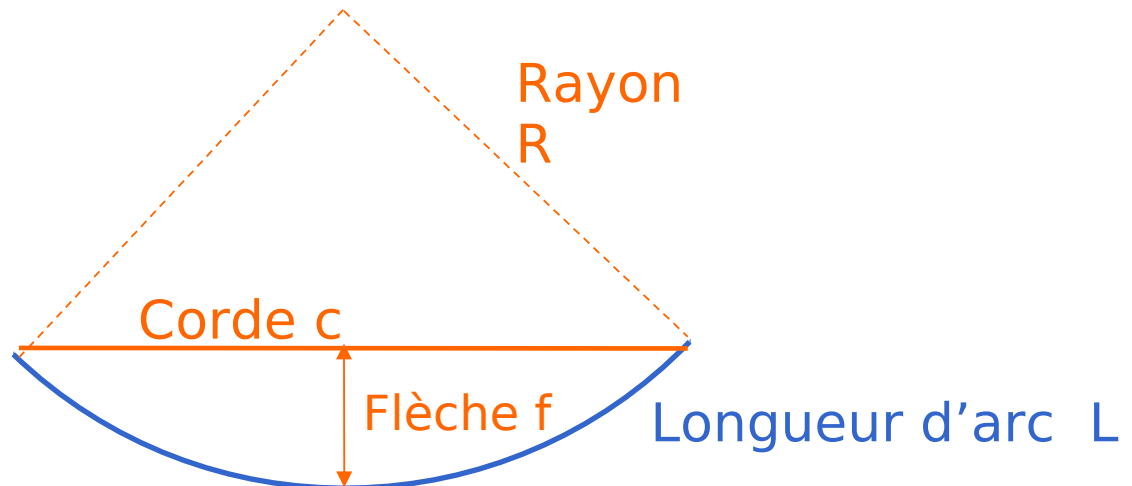
Chapeau chinois

Prédimensionnement

► Géométrie

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

$$\dots \rightarrow \text{pour une ralingue } f = \frac{c}{10} \text{ alors } R = 1.3 c$$



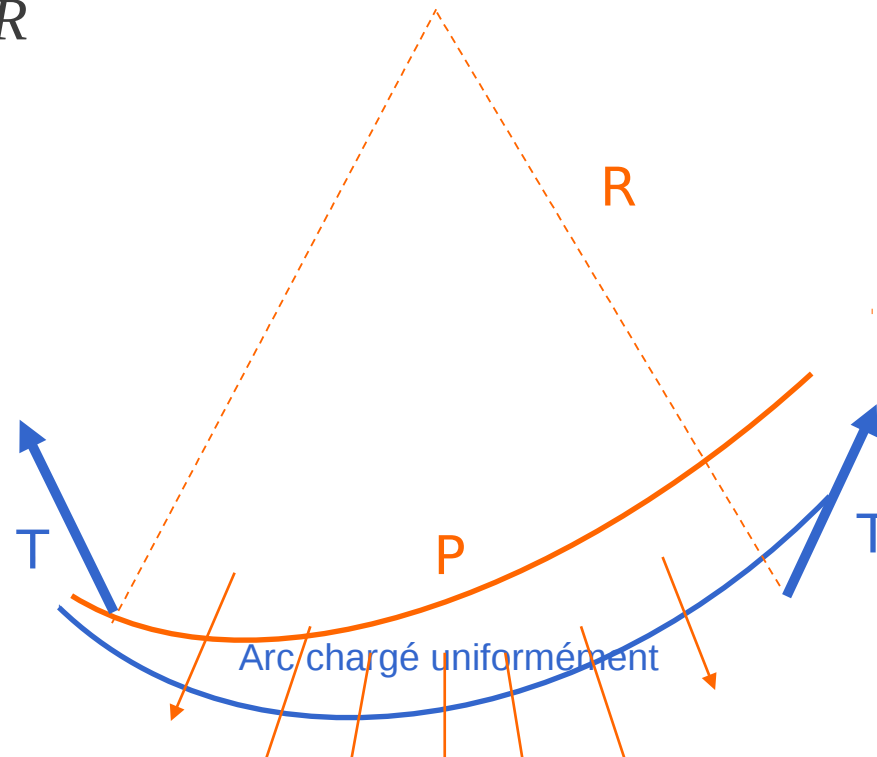
Entités géométrique remarquables d'une longueur d'arc

Prédimensionnement

► Mécanique

.....► Force de tension T dans un arc soumis à une pression uniforme P

.....► $T = P R$



Prédimensionnement

Exemple numérique

.....> Corde 10m – flèche 0.6m – Pression de neige 60daN/m²

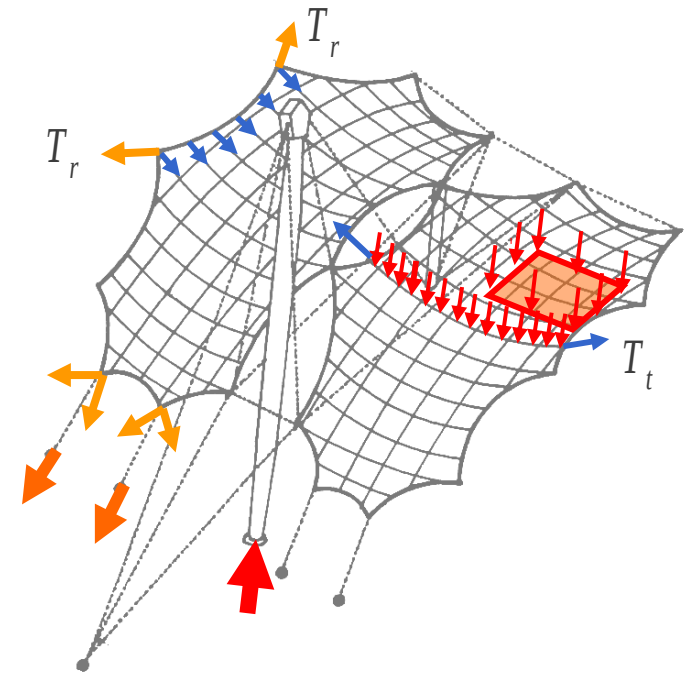
.....> $R_t = \frac{10^2}{8 \times 0.6} + \frac{0.6}{2} \approx 21 \text{ m}$

.....> $T_t = 60 \times 21 = 1260 \text{ daN/ml}$

.....> $\frac{f_r}{c_r} = \frac{1}{10}$ et $c_r \approx 5\text{m}$

.....> $R_r = 1.3 c_r = 6.5\text{m}$

.....> $T_r = T_t R_r$
 $= 1260 \text{ daN/ml} \times 6.5\text{m}$
 $= 8190 \text{ daN}$



Descente de charges

TOILE

RALINGUES

Prédimensionnement

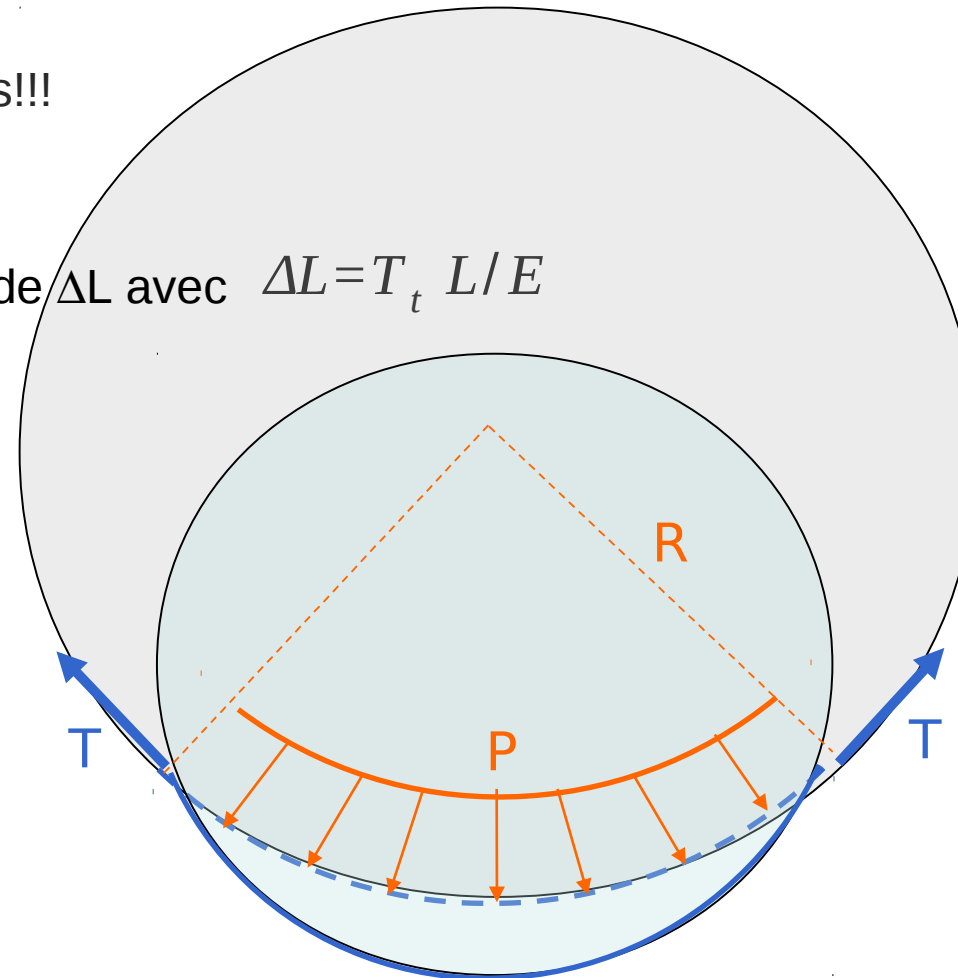
► Non prise en compte des déplacements!!!

.....► T_t augmente

.....► la longueur d'arc augmente de ΔL avec $\Delta L = T_t L / E$

.....► R_t diminue

.....► Résultats du prédim.
surdimensionnés



Descente de charges

II. Structure

Toile supportée par points

- ▶ Rives souples
- ▶ Rives rigides

Toile supportée sur arches

- ▶ Rives souples
- ▶ Rives rigides

Toile supportée par points

► Rives souples



Cardiff Bay Barrage UK 1993



Cayman International School Iles Caïman 2006

Toile supportée par points

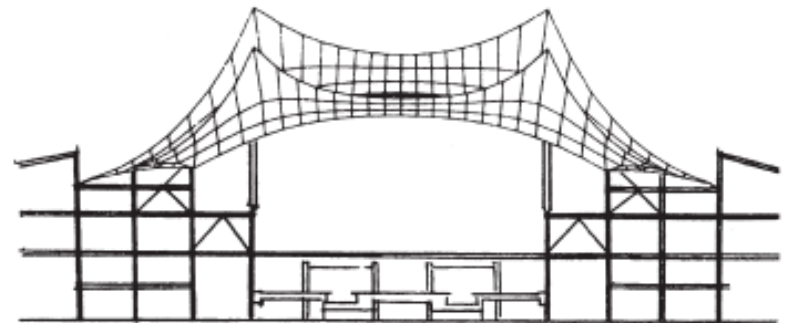
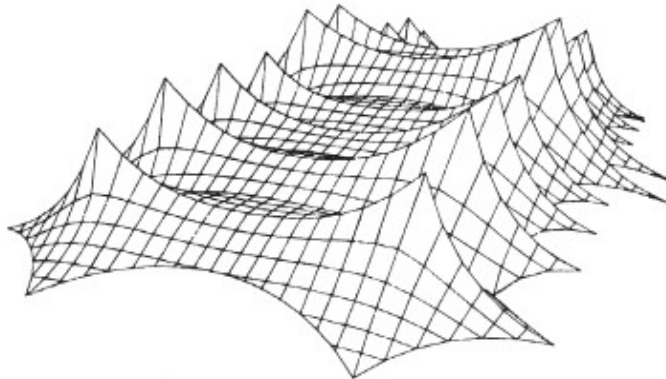
► Rives souples



Butlins Skyline Pavillion - Buro Happold - UK 1998

Toile supportée par points

► Rives souples



Denver International Airport - H. Berger - USA 1994

Toile supportée par points

- ▶ Temps de montage inférieur à tout autre système constructif
- ▶ Protection durant la construction des espaces en-dessous
- ▶ 1/10 du PP d'un système constructif classique
- ▶ Matériau économique pour la translucidité obtenue
- ▶ Coût réduit des supports et des fondations
- ▶ Moins d'équipements techniques
- ▶ Simplification du drainage des eaux pluviales
- ▶ Economie d'énergie (usage de la lumière naturelle)
- ▶ Réflexion de 70%
- ▶ Conservation de la chaleur la nuit
- ▶ Maintenance faible
- ▶ Esthétisme

Toile supportée par points

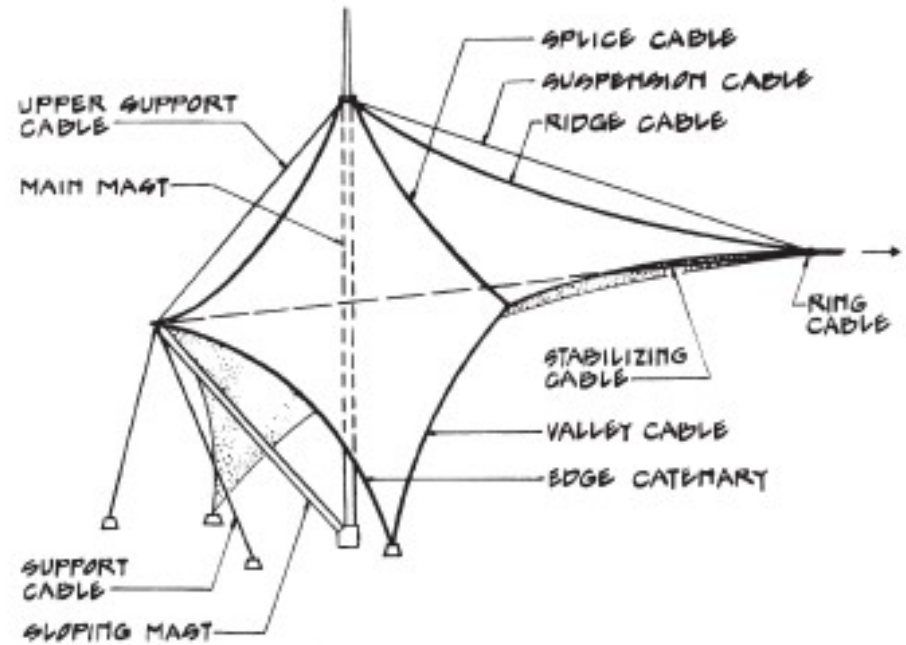
► Rives souples



Riyadh Stadium – H.Berger – Schlaich Bergermann & Partners – Arabie Saoudite 1984

Toile supportée par points

► Rives souples



Toile supportée par points

- ▶ Rives souples
- ▶ Structure extérieure



Cotham School – UK – 2002

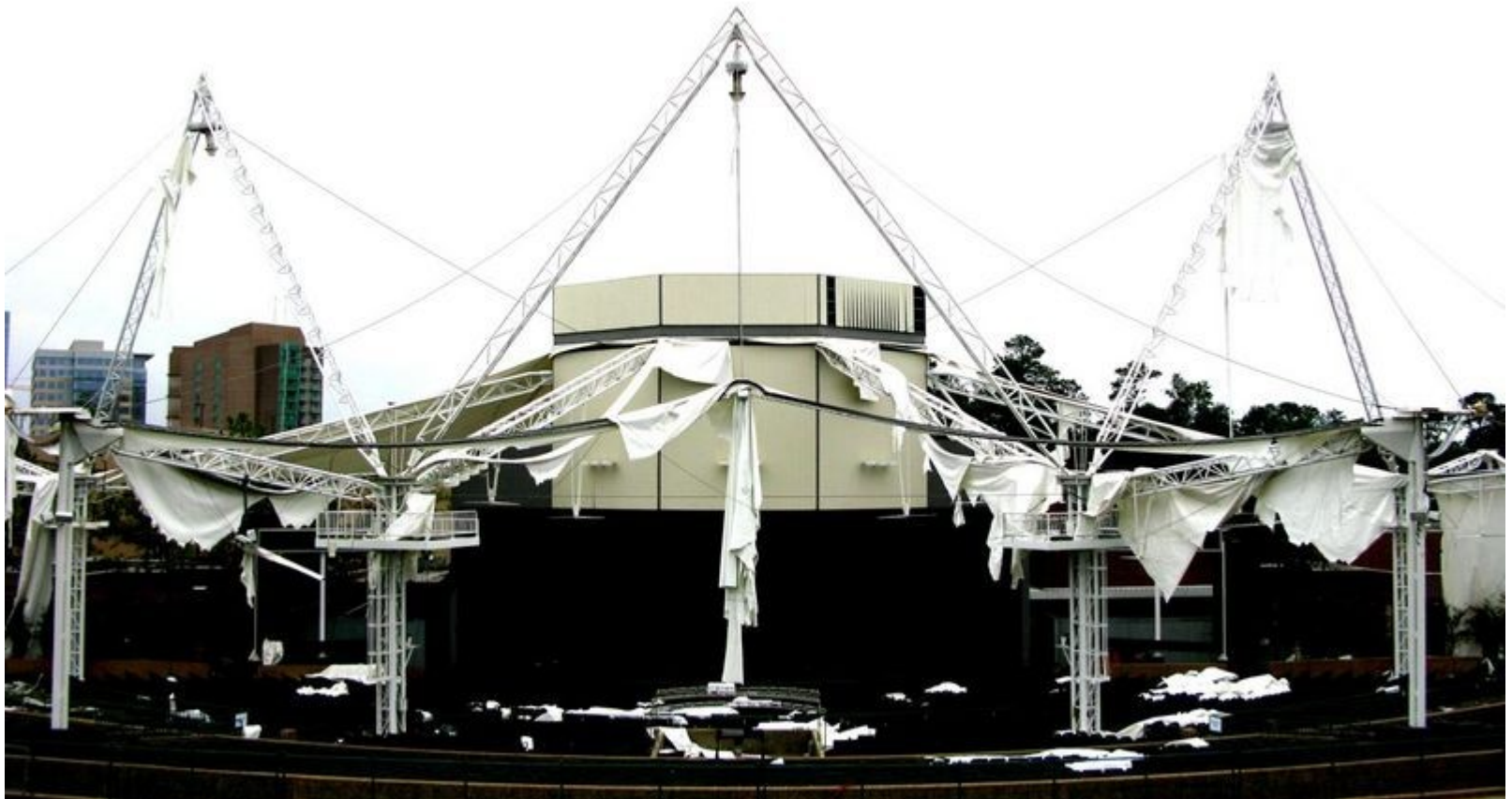
Toile supportée par points

- ▶ Rives souples
- ▶ Structure extérieure



Mitchell Performing Center – H. Berger – USA – 1990

Toile supportée par points



Mitchell Performing Center après l'ouragan Ike 2008

Toile supportée par points

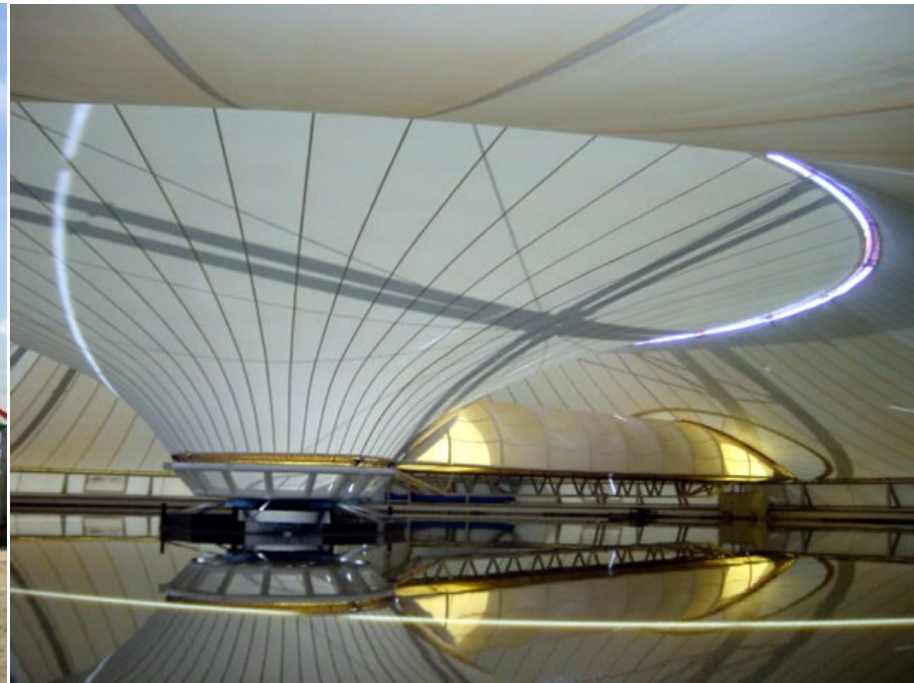
► Rives rigides



Halle d'exposition – Arcora – France 1990

Toile supportée par points

- ▶ Rives rigides



Toile supportée par points

- ▶ Rives rigides



Paper Church – Shigeru Ban – Japan 1995-2005

Toile supportée par points

- ▶ Rives rigides



Kano / Amagi Dome – Japan 1991

Toile supportée par points

- ▶ Rives souples + rives rigides



Toile supportée par points

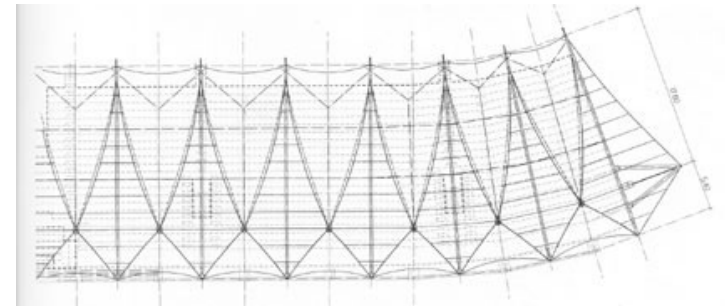
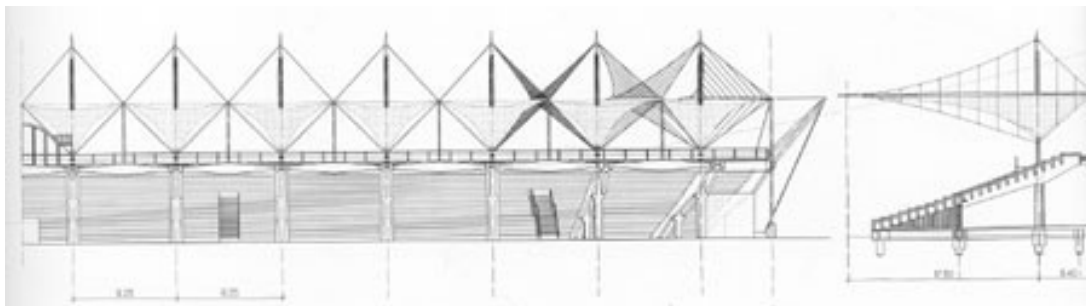
- ▶ Rives souples + rives rigides



Glyndebourne Opera House UK 1994

Toile supportée par points

- ▶ Rives souples + rives rigides



Toile supportée par points

- ▶ Rives souples + rives rigides



Toile supportée sur arches

► Rives souples



Toile supportée sur arches

► Rives souples



Plashet Unity Bridge UK 2000

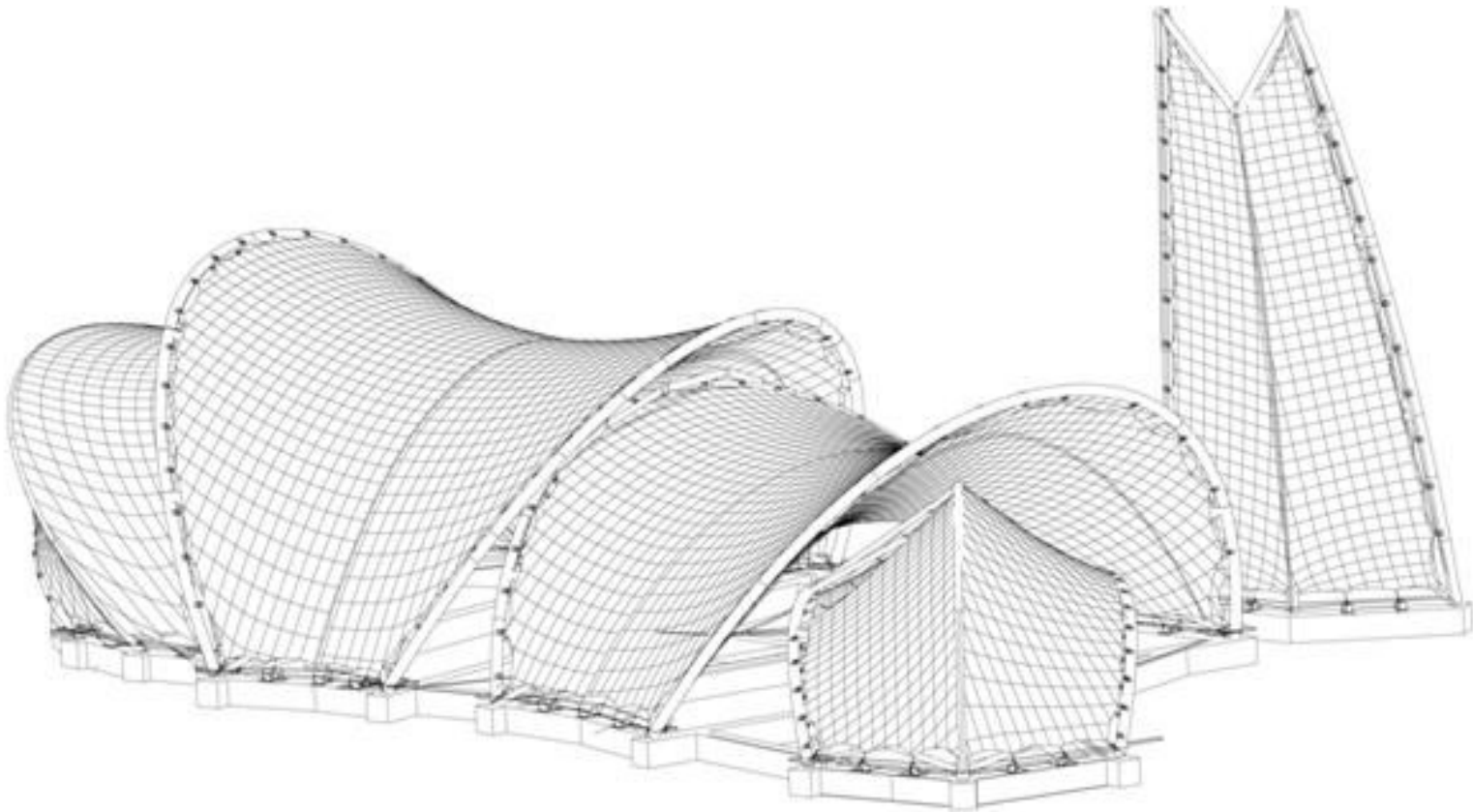
Toile supportée sur arches

- ▶ Rives souples



Toile supportée sur arches

► Rives souples



Toile supportée sur arches

- ▶ Rives souples



Grand Hangar Air Bus - Arcora - France 1992

Toile supportée sur arches

- ▶ Rives souples
- ▶ Structure extérieure



Chemical Research Center Italie ~1992

Toile supportée sur arches

- ▶ Rives rigides



Zénith de Paris – Arcora – 1985

Toile supportée sur arches

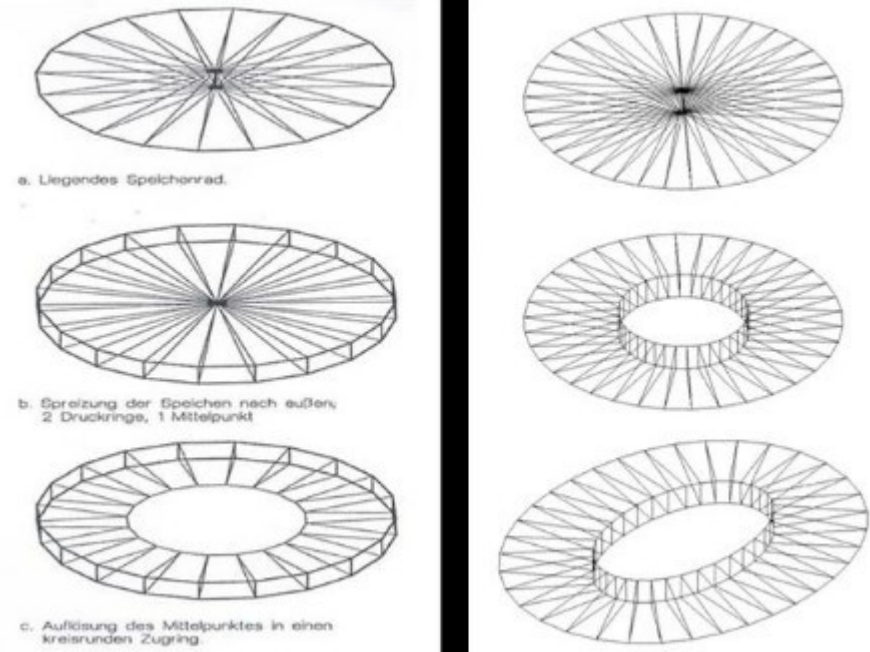
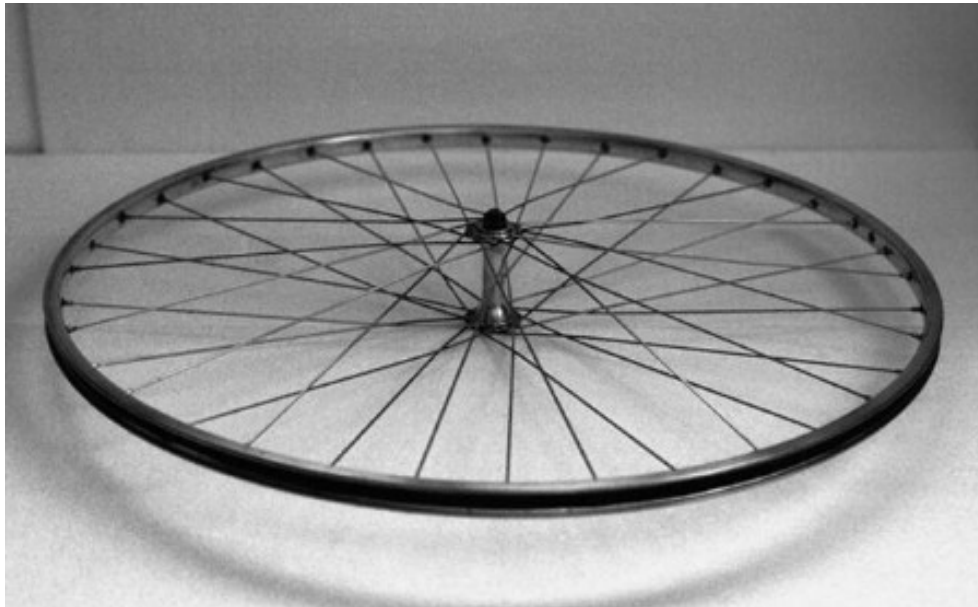
- ▶ Rives rigides



Centre de tri – Arcora - 1997

Toile supportée sur arches

► Rives rigides



Schlaich & Bergemann – Développement structurel à partir d'une roue de vélo

Toile supportée sur arches

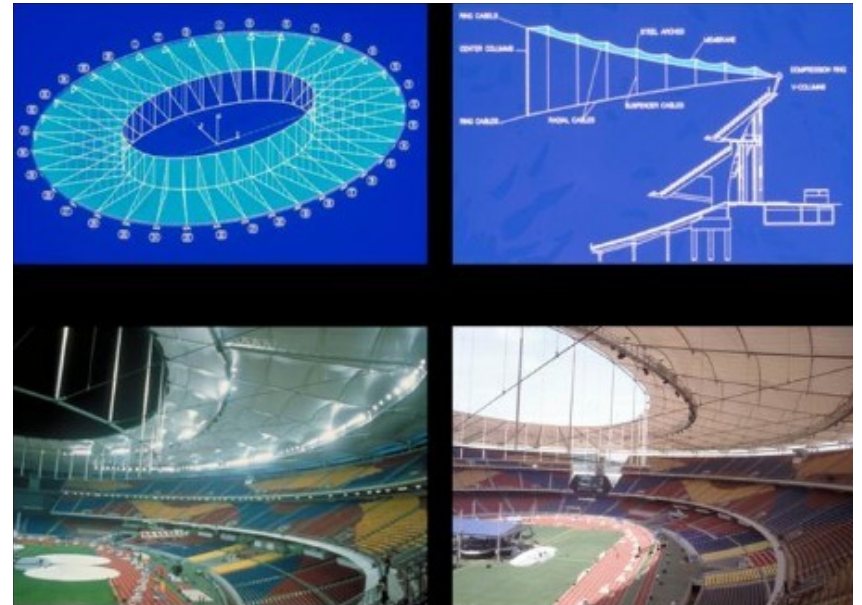
- ▶ Rives rigides



Gottlieb Daimler Stadium 2006

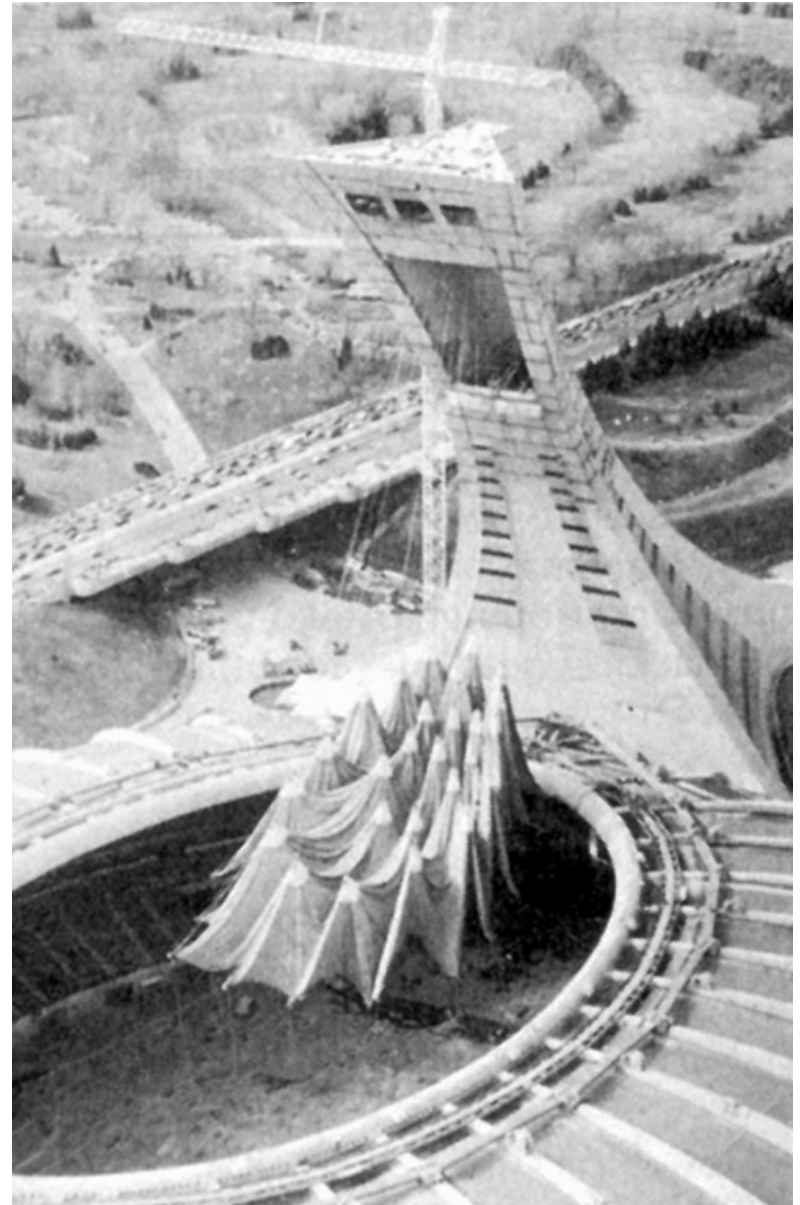
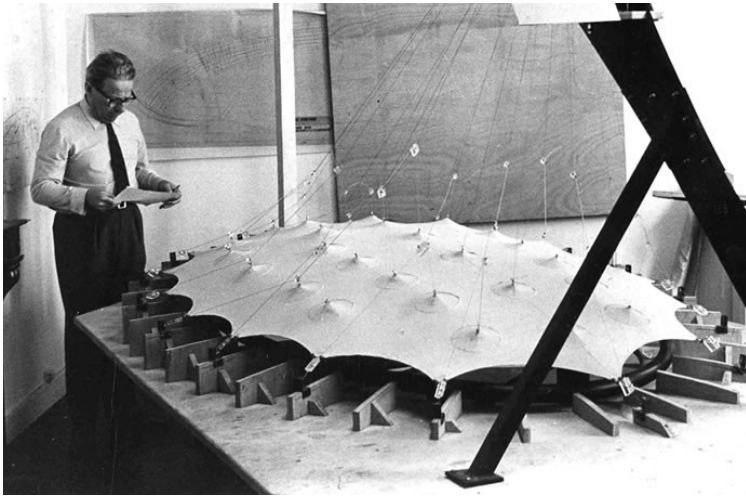
Toile supportée sur arches

► Rives rigides



National Stadium Malaysia 1998

Systemes deployables



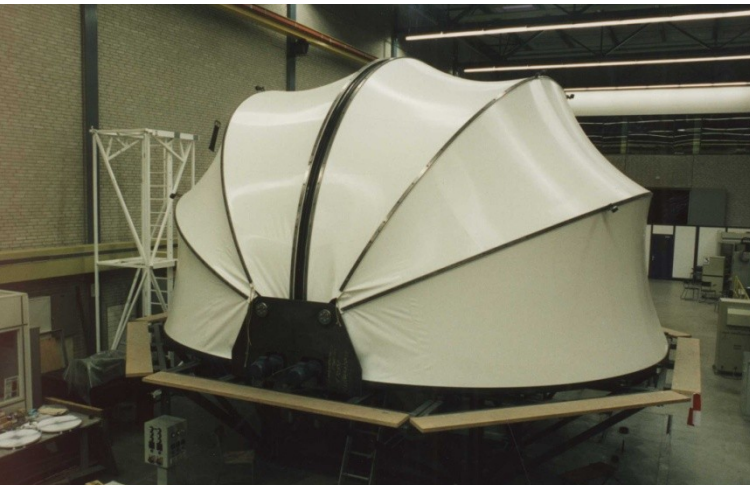
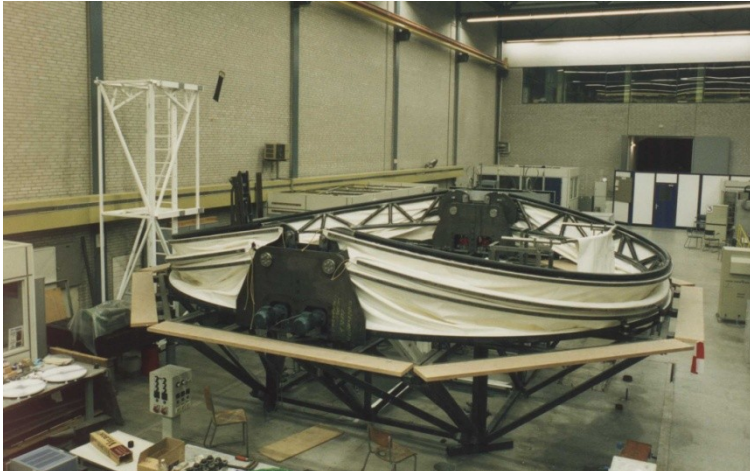
Olympique stadium – Buro Happold - 1987

Systemes deployables



Extension Mosquée – Arabie Saoudite – Buro Happold - ~1995

Systemes deployables

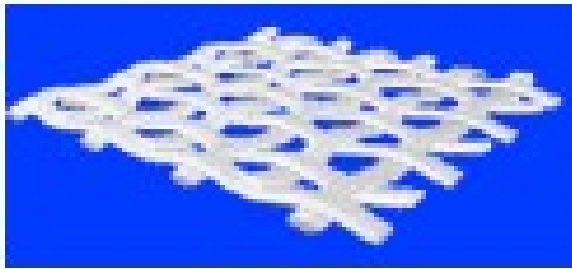


Dutch Open Telescope - Hollande

III. Matériau

Toile

- ▶ Fibres tissées : résistance mécanique
- ▶ Enduction : Protection UV, contre abrasion, soudure, traitement au feu, couleur...
- ▶ Traitement de surface : auto-nettoyant...



- ▶ Fibres polyester enduites PVC (polyvinyl chloride) + précontrainte ($\sim 1000 \text{ daN/m}$)
- ▶ Fils de verre enduits PTFE (polytétrafluoroéthylène)
- ▶ Fils de verre enduits silicone

Toile

▶ polyester / PVC précontraint

orthotrope

souple

prétension 150 à 300 daN/m **ingénierie**

renforts

▶ Fils de verre enduits PTFE

orthotrope

très rigide

250 à 450 daN/m

glissement câbles

soudures HF

confection

thermique - spécialistes

souple flexible

manipulation

très fragile à la pliure

fixes et démontables

fixes uniquement



Toile

coût

PTFE ~3x plus cher /m²

▶ polyester / PVC précontraint

▶ Fils de verre enduits PTFE

orthotrope

souple

prétension 150 à 300 daN/m **ingénierie**

renforts

orthotrope

très rigide

250 à 450 daN/m

glissement câbles

soudures HF

confection

thermique - spécialistes

souple flexible

manipulation

très fragile à la pliure

fixes et démontables

fixes uniquement

pas de gouttes

réaction au feu

émanation très toxique

PVDF auto-nettoyant -

maintenance détergent

esthétique

auto-nettoyant en pente

nettoyage en zone plate

15 ans

durabilité

50 ans

recyclable

recyclage

décharge

Toile

► Résistance

PES/PVC	weight in gr/m ²	Tensile strength daN/m
Type I	600-800	6 000 / 6 000
Type II	900-1050	8400 / 8 000
Type III	1 050-1 350	11 000 / 10 400
Type IV	1 300-1 500	12 000 / 13 000
Type V	1 450-1 650	16 000 / 17 000

GLASS/PTFE	weight in gr/m ²	Tensile strength daN/m
G1	420	2 600 / 2 200
G2	500	4 300 / 2 800
G3	800	7 000 / 7 000
G4	1 000	9 000 / 7 200
G5	1 200	12 400 / 10 000
G6	1 500	14 000 / 12 000
G7	1 600	17 000 / 15 800

Toile : Nouveautés

- ▶ Matériaux synthétiques ultra-léger : 150g/m²
- ▶ Explorations structurales



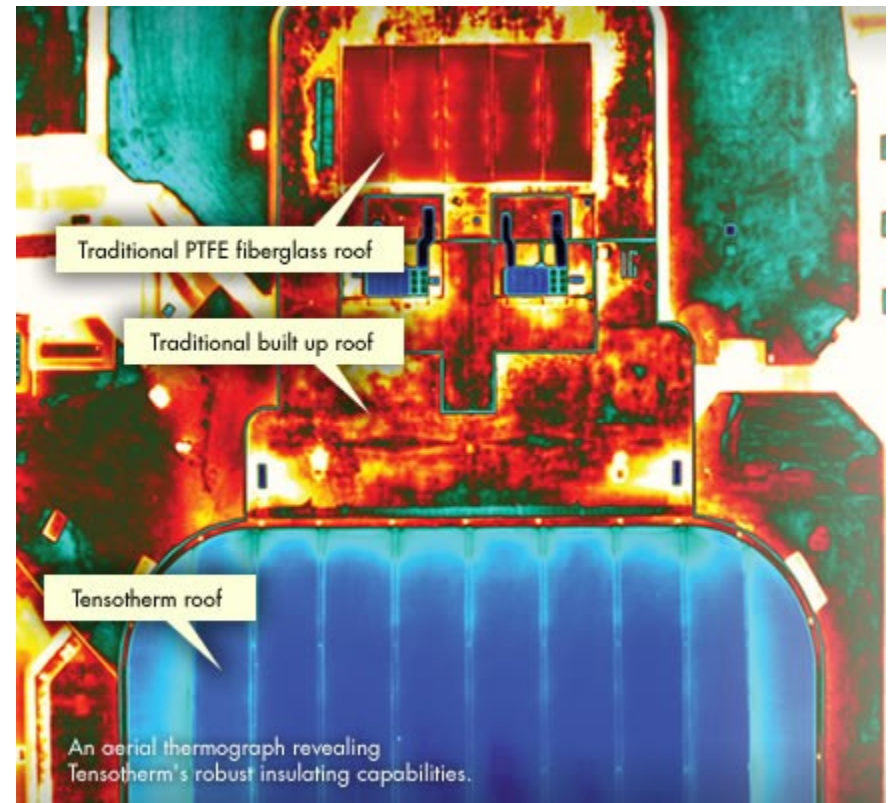
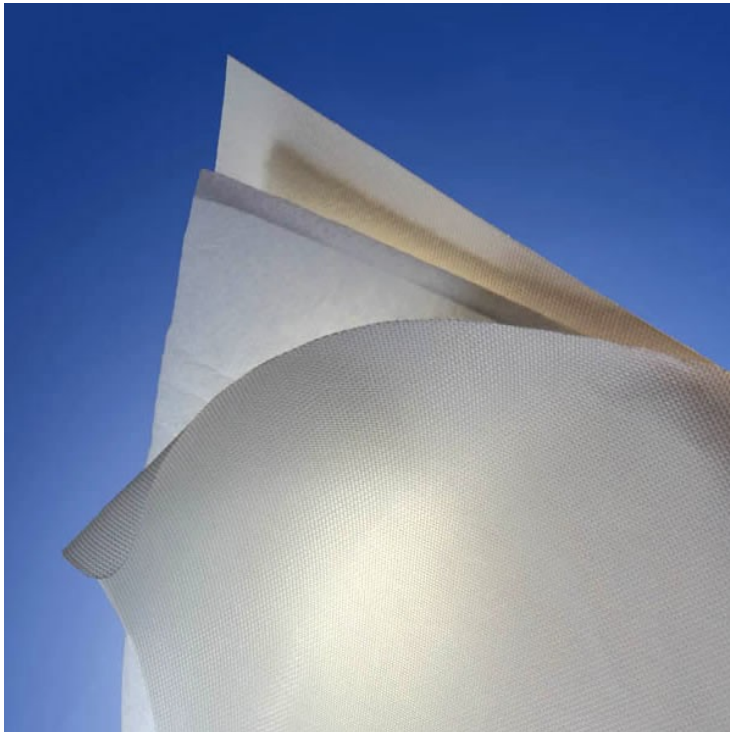
Toile : Nouveautés

- ▶ Matériaux synthétiques ultra-léger : 150g/m
- ▶ Explorations structurales



Toile : Nouveautés

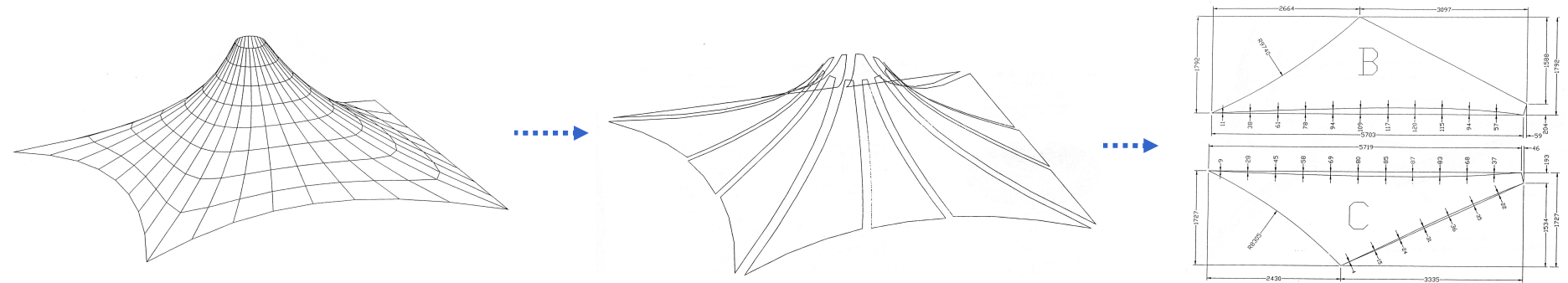
- ▶ Tensotherm Birdair : membrane composite avec nanogel
- ▶ Légèreté
- ▶ Isolation thermique
- ▶ Isolation acoustique



IV. Technologie

Découpe de laize

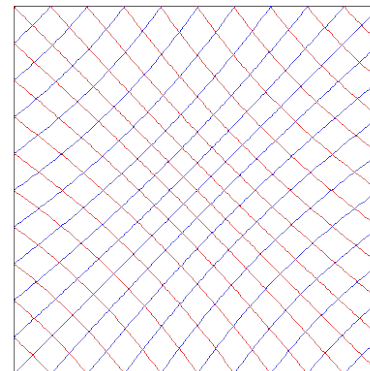
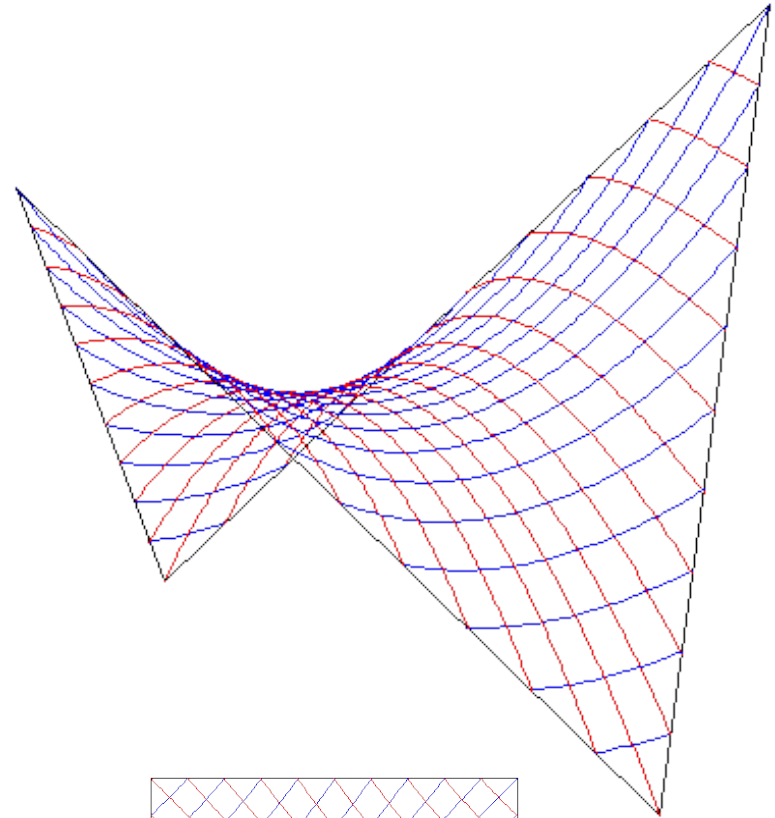
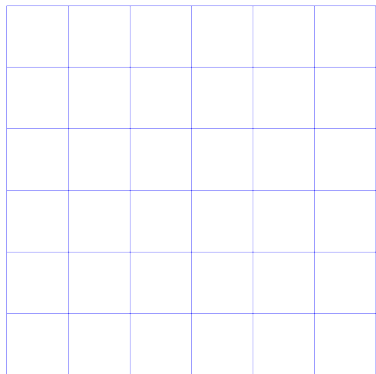
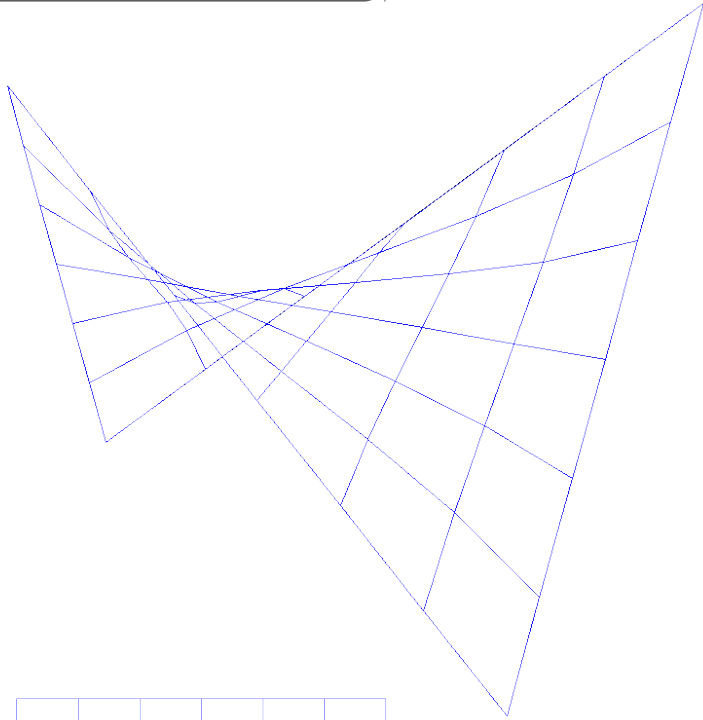
- ▶ Choix des lignes de découpe
- ▶ Patron de coupe (3D à 2D)
- ▶ Compensation (fonction de la précontrainte, du matériau et de la laize)
- ▶ Décalage soudure



Découpe de laize

- ▶ Pas de solution théorique !!▶ Principales erreurs générées à ce stade
- ▶ Nombreux paramètres en jeu
 -▶ **technologie** : taille du rouleau manufacturé
 -▶ **coût** : nombre de laizes, chutes de matériau
 -▶ **géométrie** : valeur de la courbure, lignes géodésiques
 -▶ **mécanique** : direction de contraintes principales sous charges climatiques, connections ralingues, pointes de toile
 -▶ **matériau** : différentes résistances en chaîne et trame

Découpe de laize



Découpe de laize

- ▶ Pas de solution théorique !!▶ Principales erreurs générées à ce stade
- ▶ Nombreux paramètres en jeu
 -▶ **technologie** : taille du rouleau manufacturé
 -▶ **coût** : nombre de laizes, chutes de matériau
 -▶ **géométrie** : valeur de la courbure, lignes géodésiques
 -▶ **mécanique** : direction de contraintes principales sous charges climatiques, connections ralingues, pointes de toile
 -▶ **matériau** : différentes résistances en chaîne et trame
 -▶ **esthétique** : rythme visuel (nuit), choix architectural

Découpe de laize

▶ Méthodes géométriques

.....▶ Triangulation classique

.....▶ programmation CAD simple mais perte d'informations géométriques

.....▶ Triangulation considérant les distances géodésiques

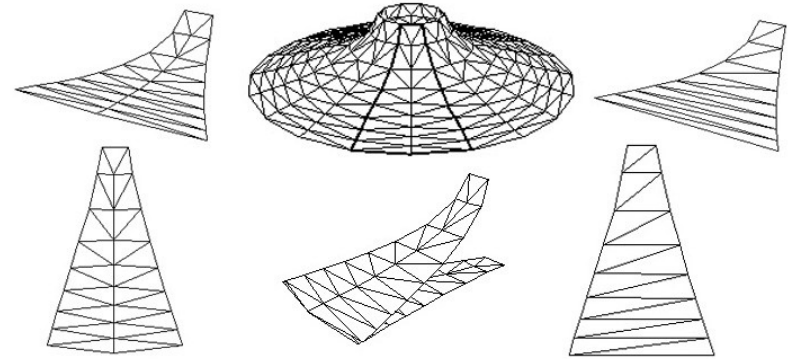
.....▶ + optimisations sup.

▶ Méthodes mécaniques

.....▶ Minimisation

.....▶ calculs lourds et perte d'informations géométriques en raccords de laizes

Triangulation classique la plus utilisée!



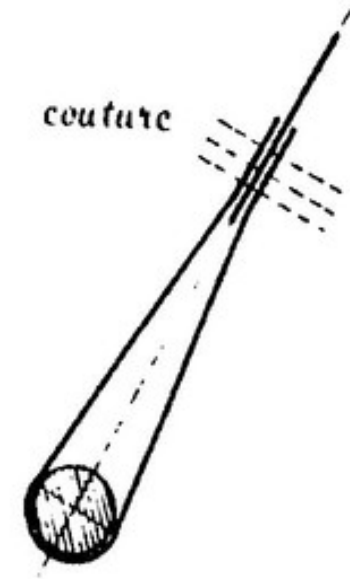
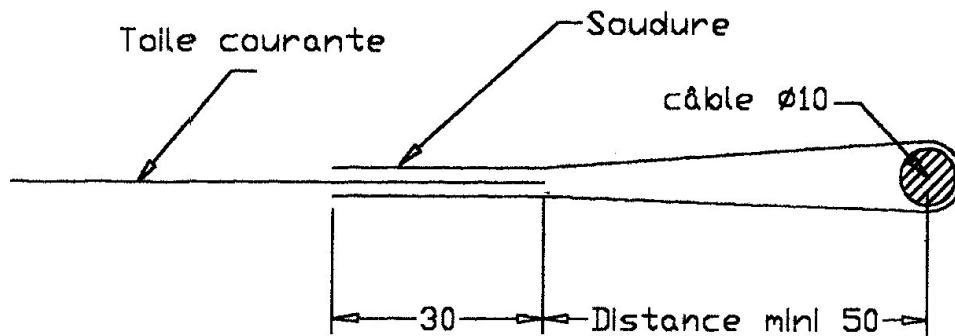
Détails

► Rives souples

.....► PVC

Détail foureau de ralingue

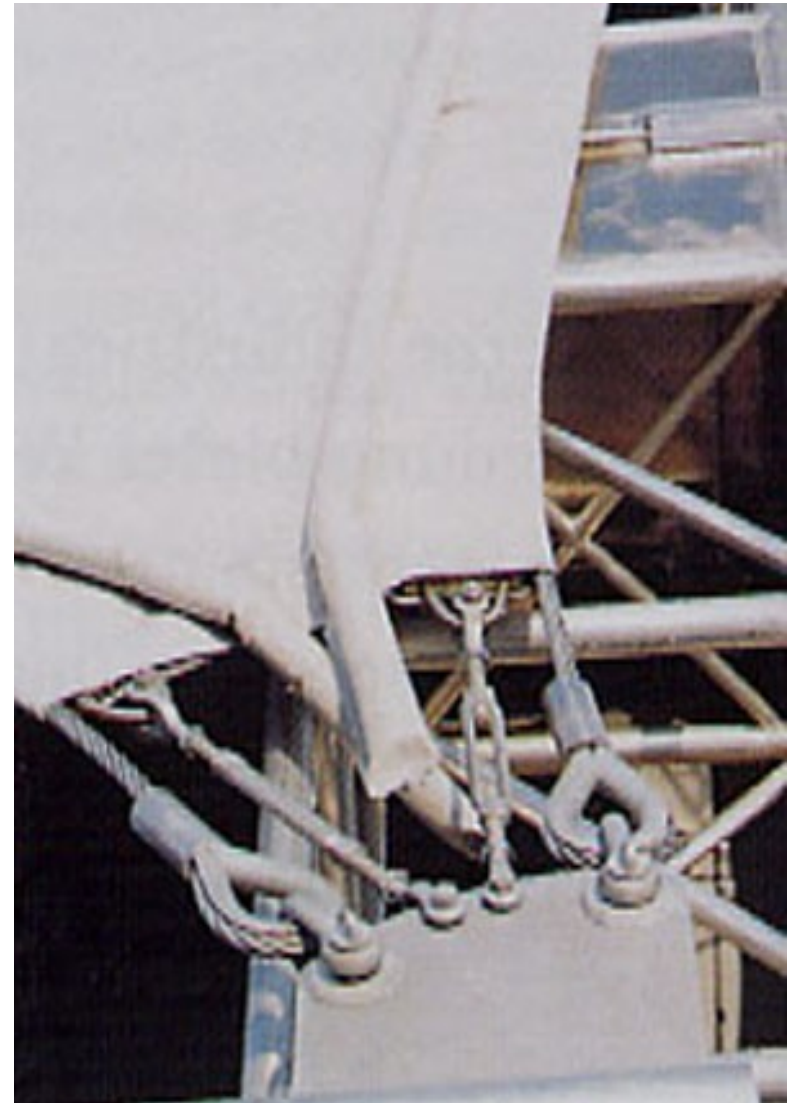
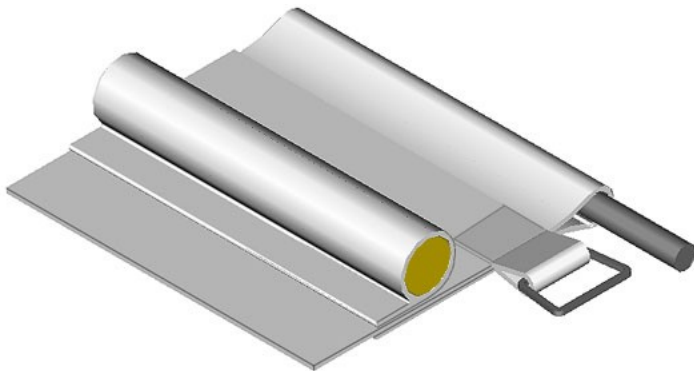
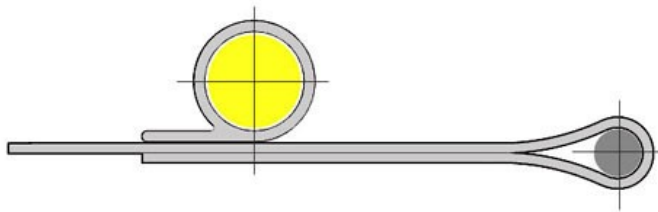
Bande rapportée taillée dans le biais du tissu



Détails

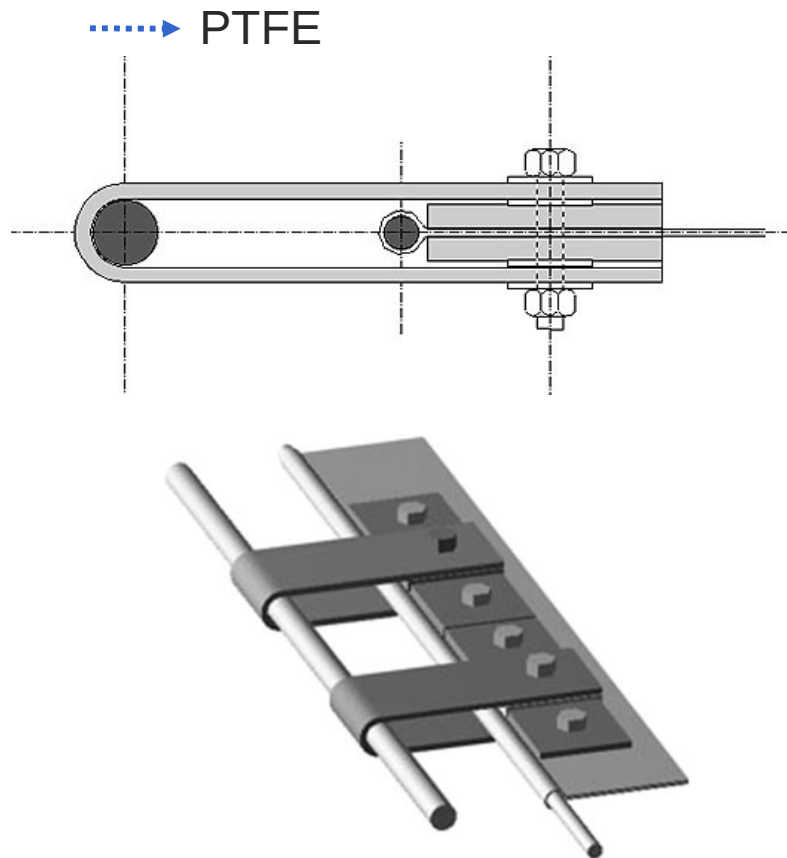
▶ Rives souples

.....▶ PVC



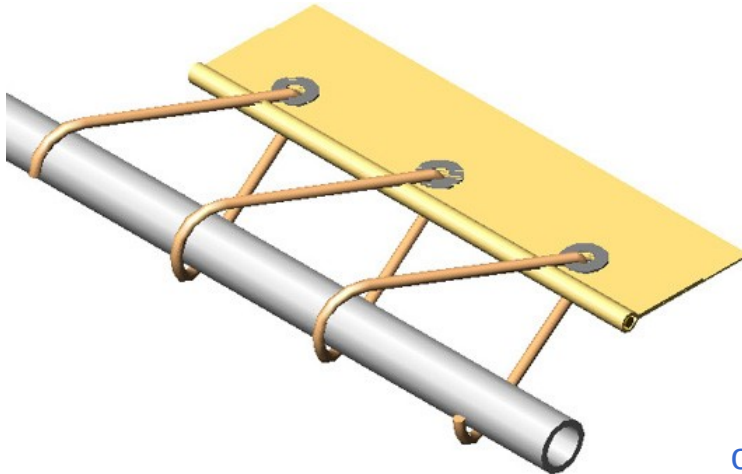
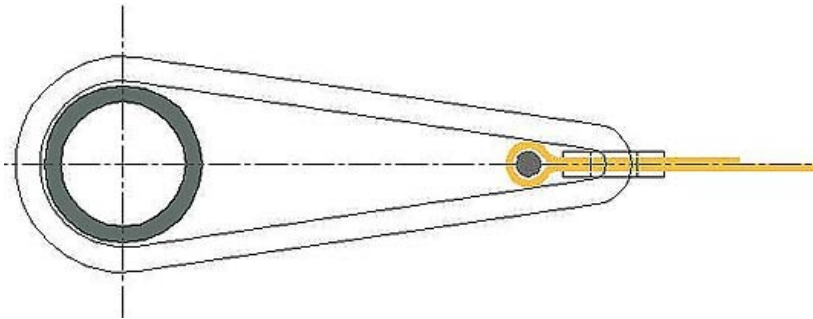
Détails

► Rives souples



Détails

► Rives rigides

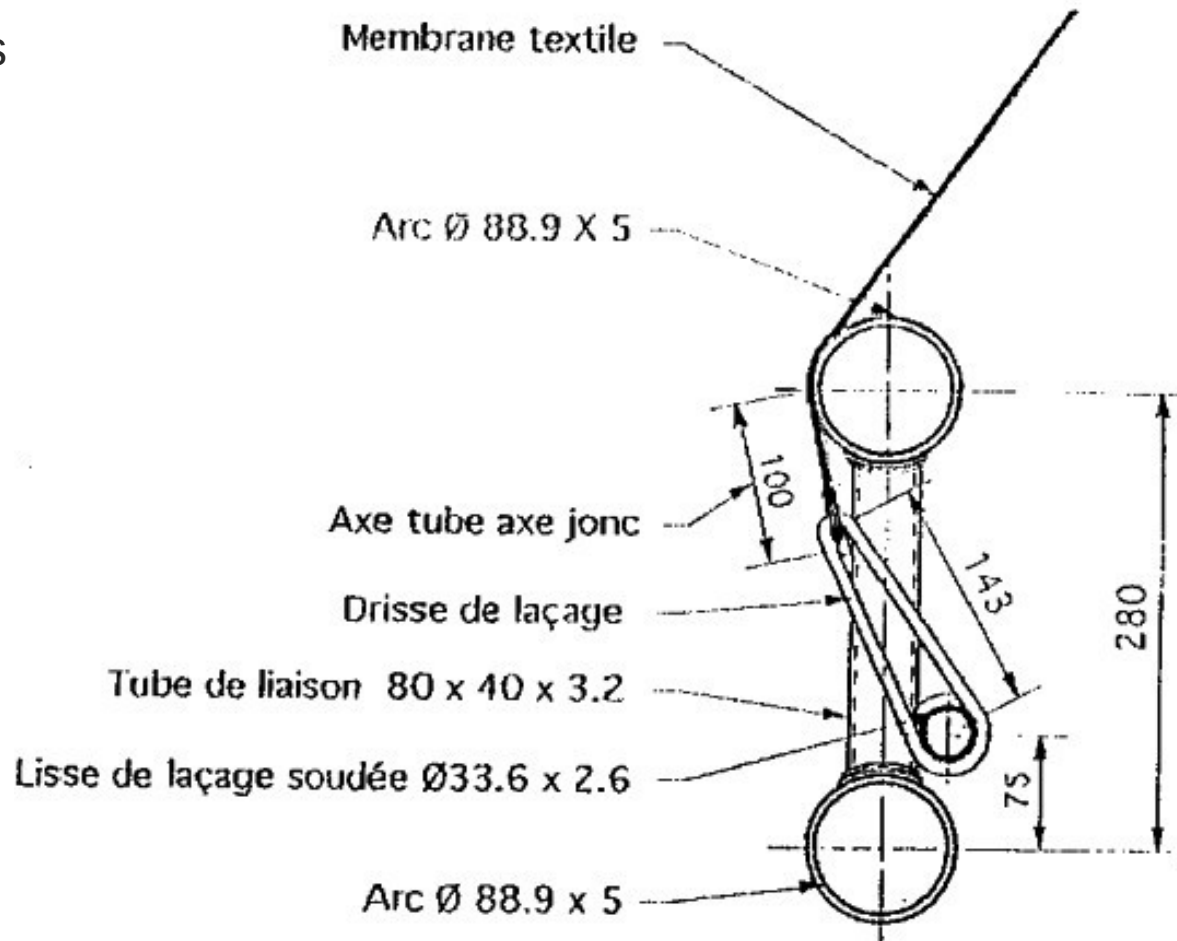


oeillets



Détails

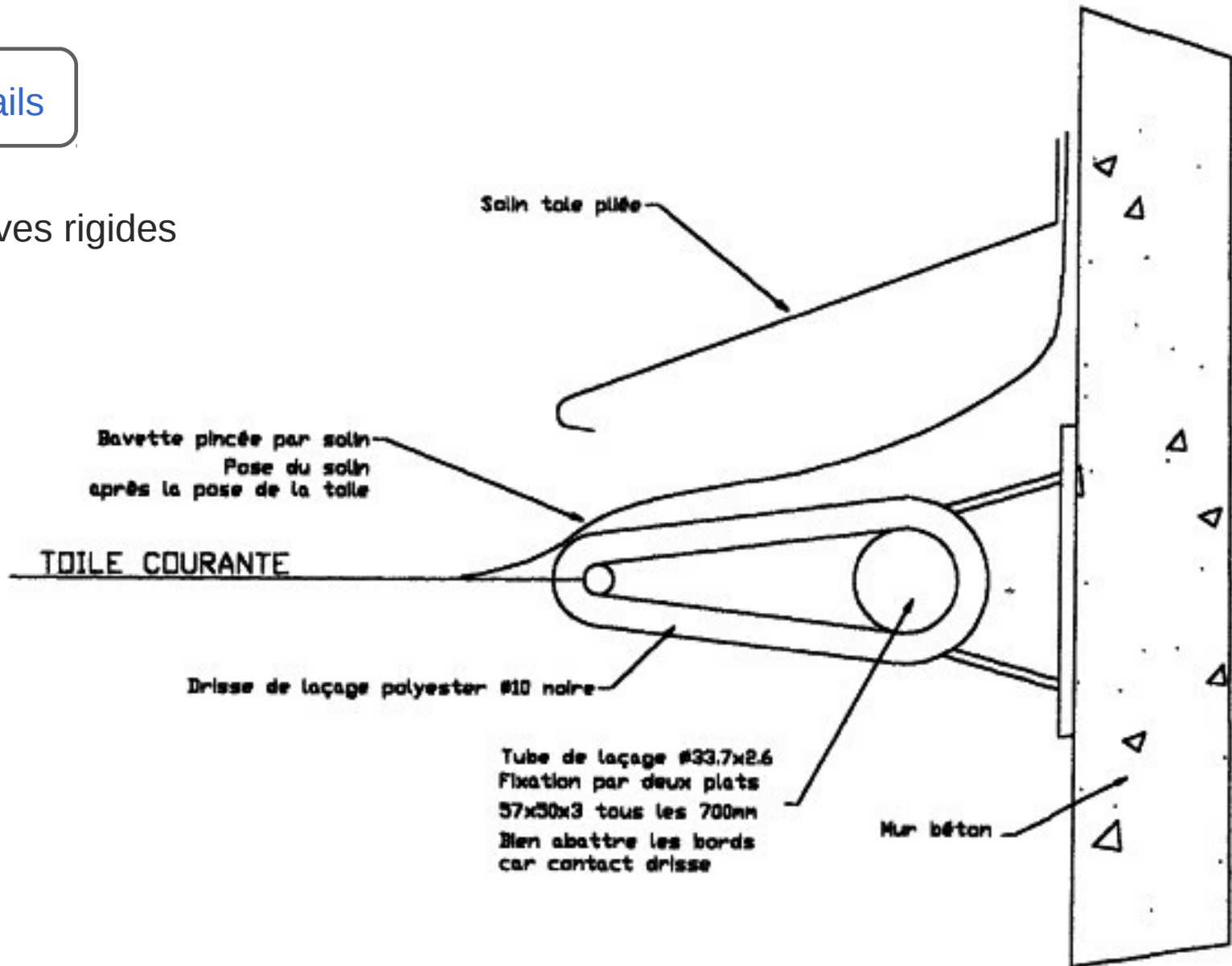
► Rives rigides



Œillets + étanchéité

Détails

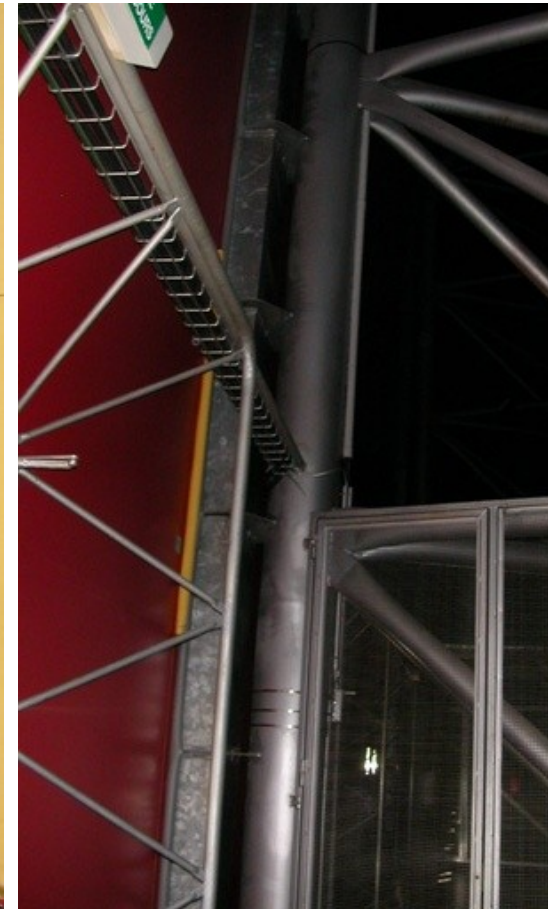
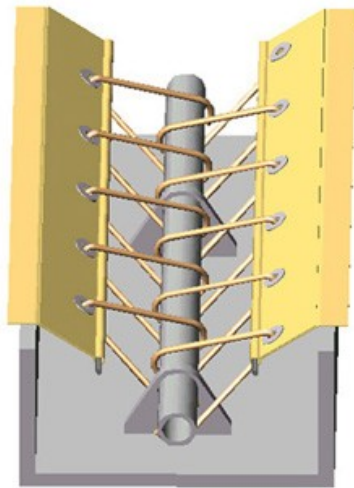
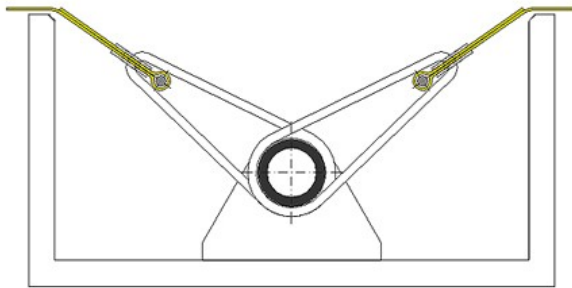
► Rives rigides



Œillets + étanchéité

Détails

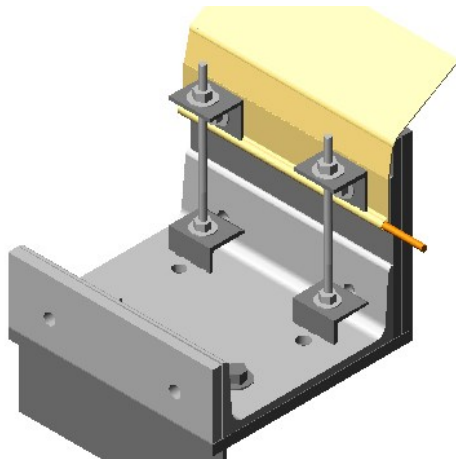
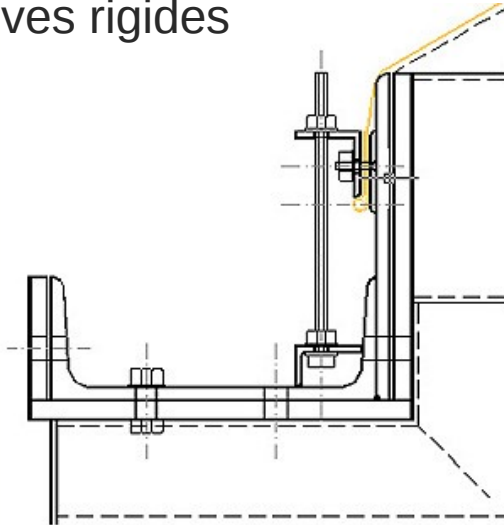
► Rives rigides



Œillets + chéneau structurel

Détails

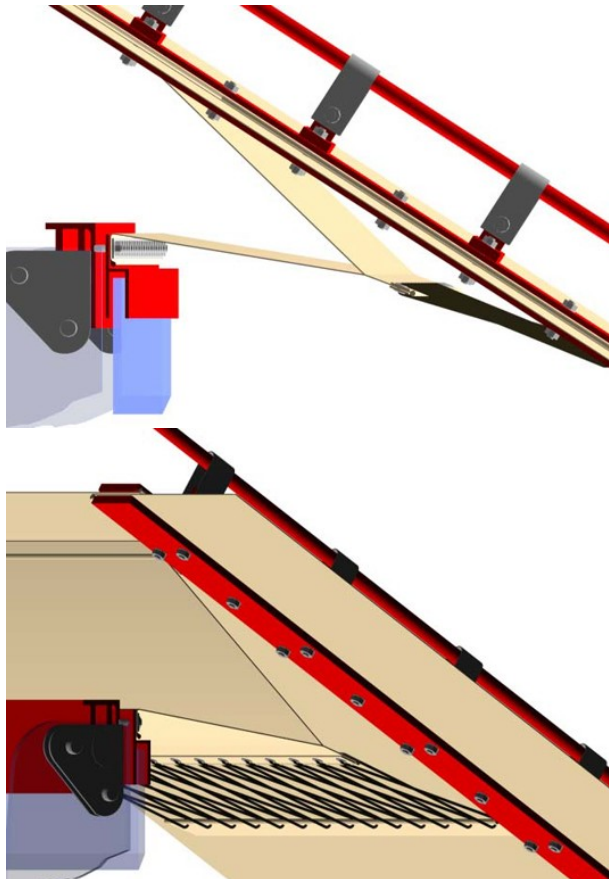
► Rives rigides



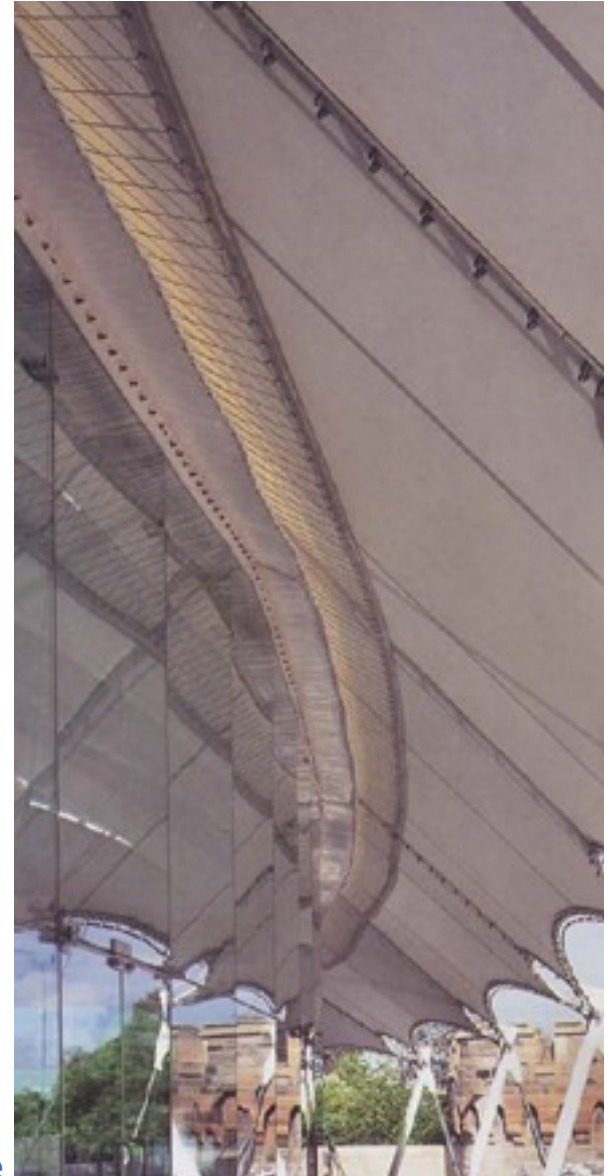
plaquettes + chéneau structurel

Détails

► Rives rigides

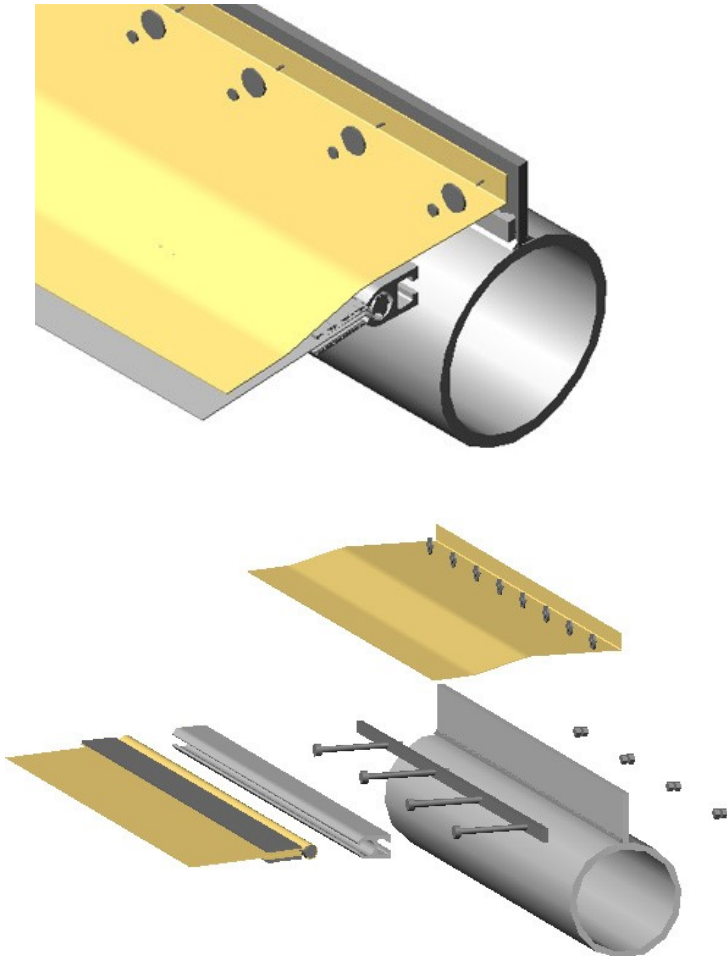


plaquettes + laçage



Détails

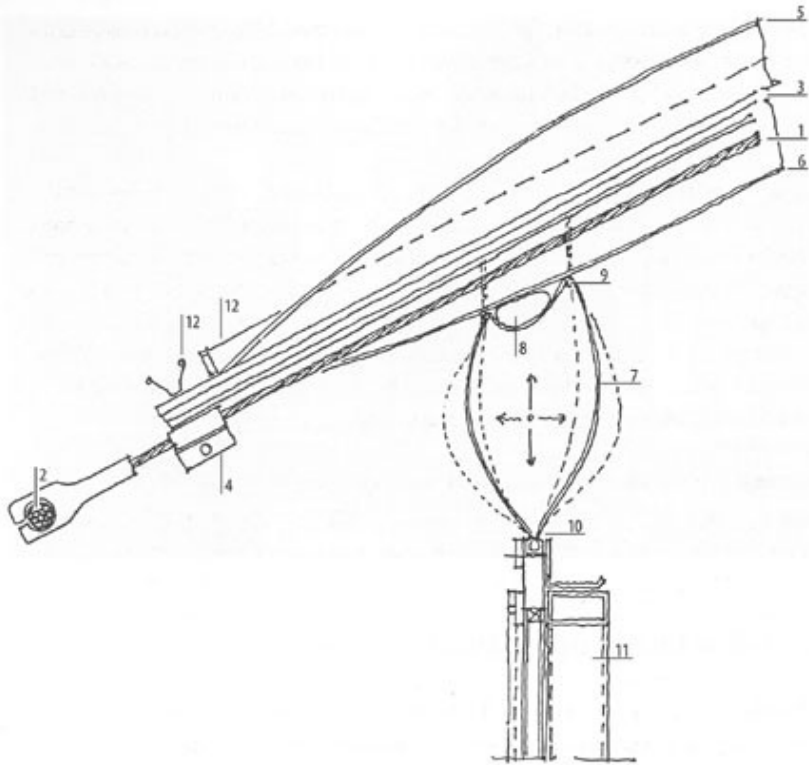
► Rives rigides



Guide à gorge

Détails

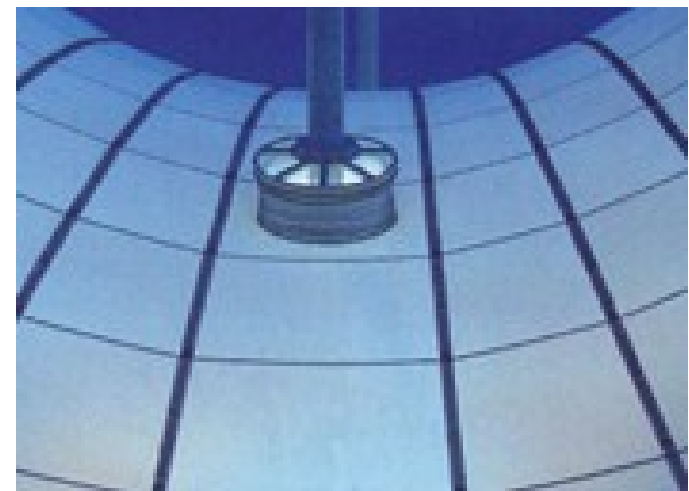
► Autorisation déplacements



Boudin gonflable à pression variable

Détails

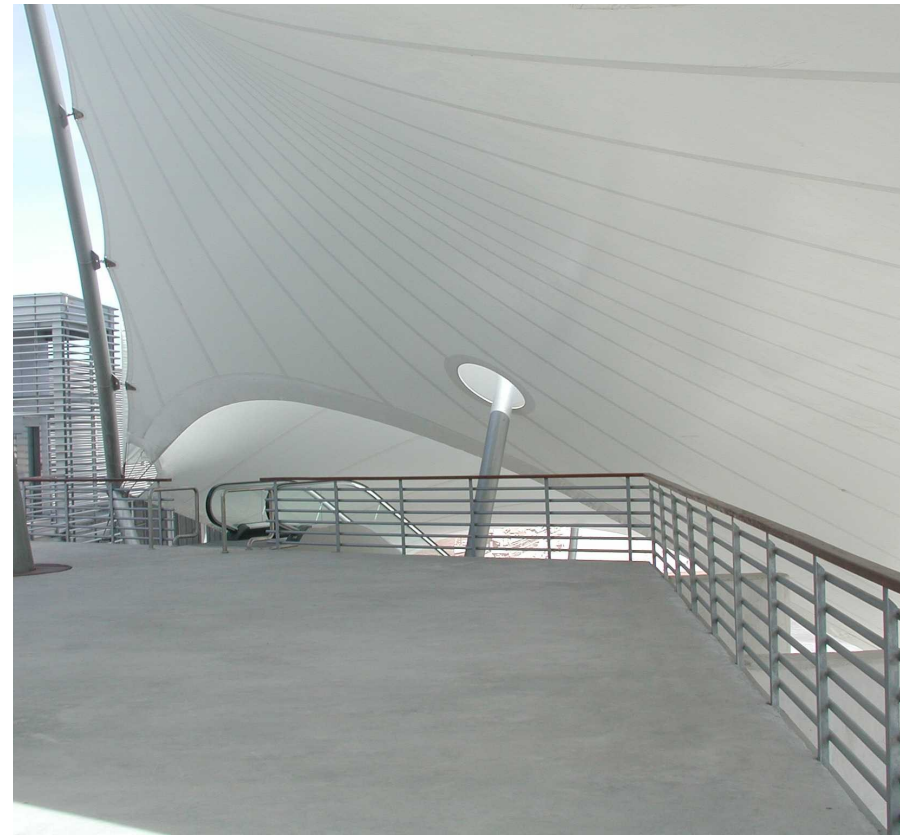
► Autorisation déplacements



Étanchéité liaison mât-toile – autorisation des déplacements – Paradise – Japon

Détails

▶ Autorisation déplacements



Station Maritime – Espagne - 2003

Détails

► Tête de mâts

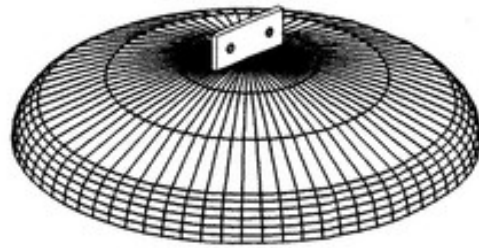


Schéma de principe



Fond GRC classique

Détails

► Tête de mâts



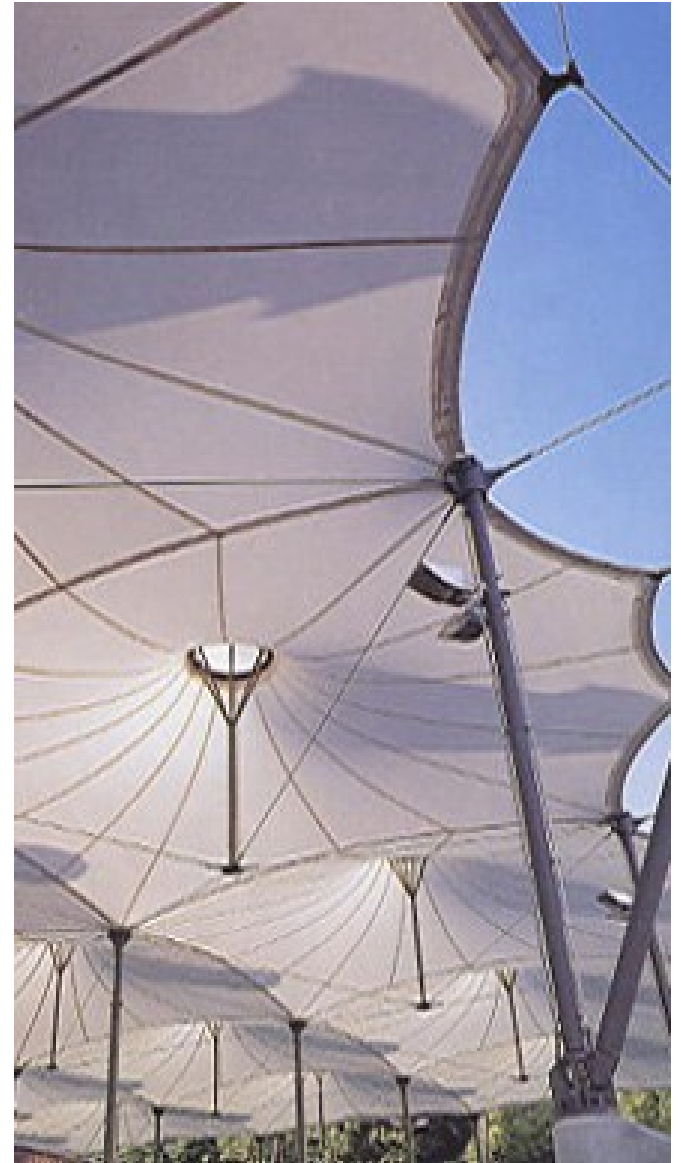
Mât volant

Détails

► Tête de mâts

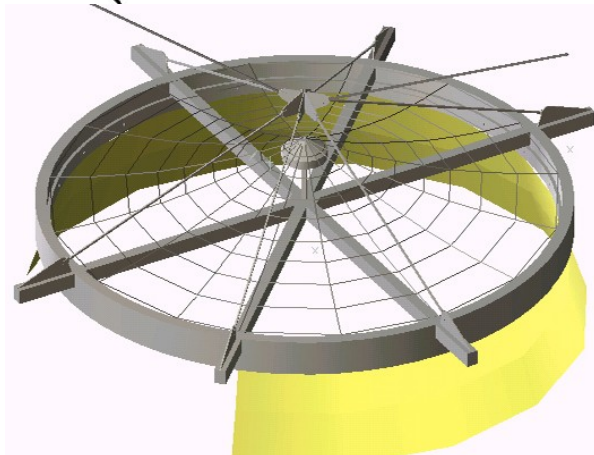
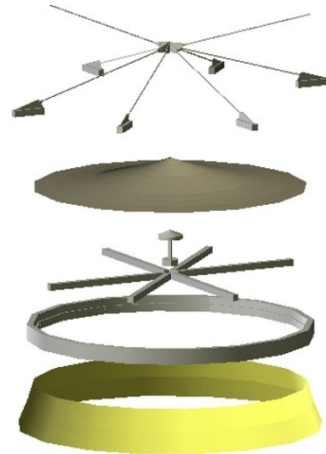
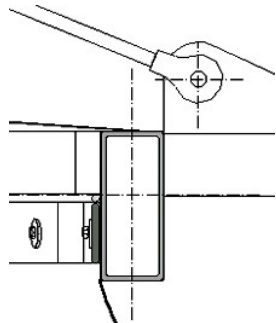


Mât volant



Détails

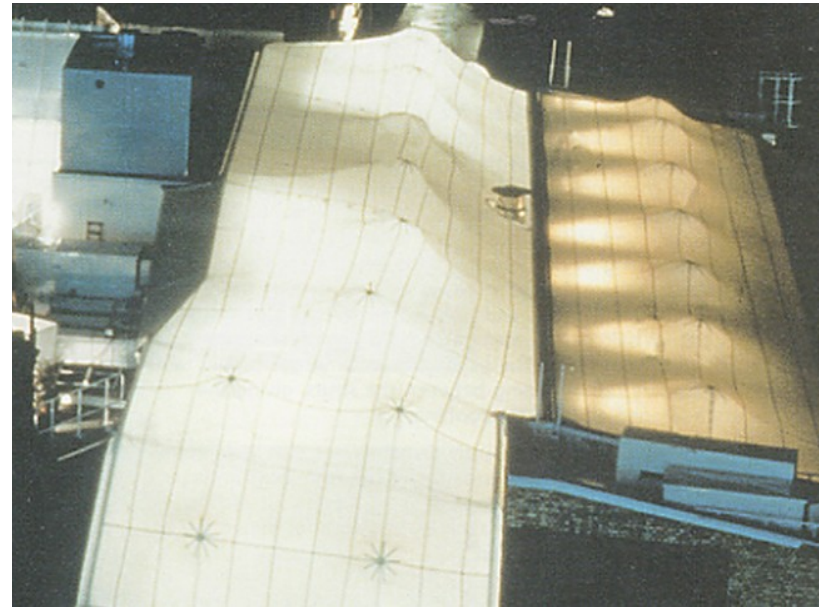
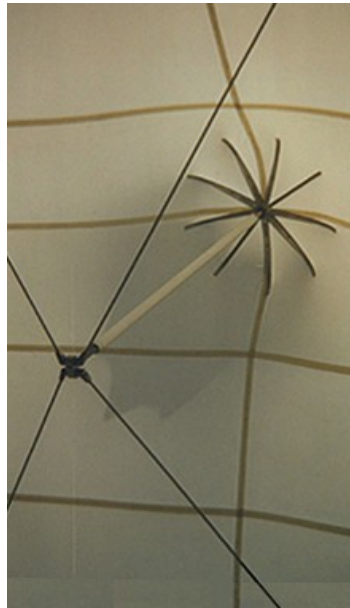
► Tête de mâts



Cricket Ground – détail Arup + Hopkins

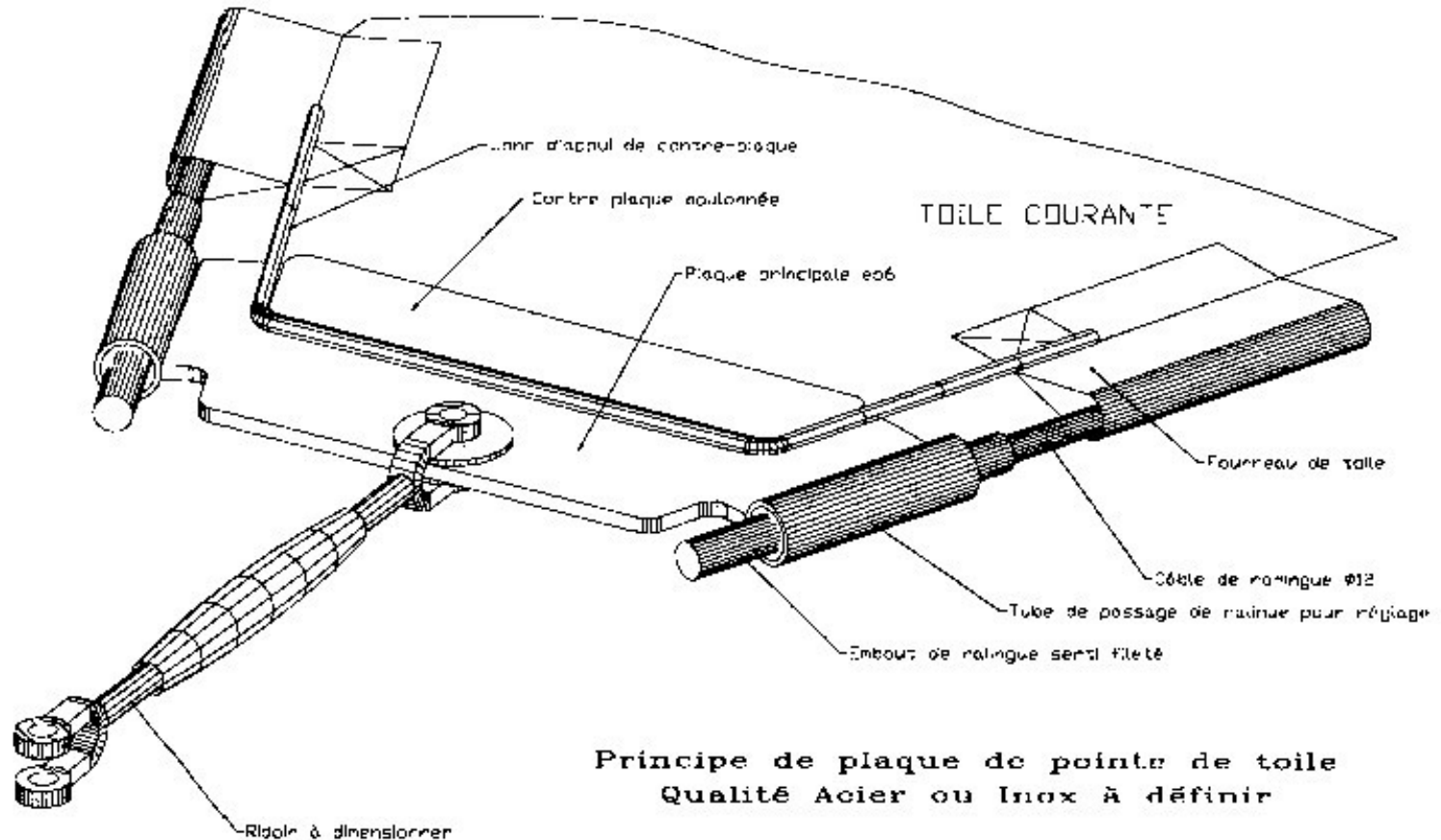
Détails

► Tête de mâts



Détails

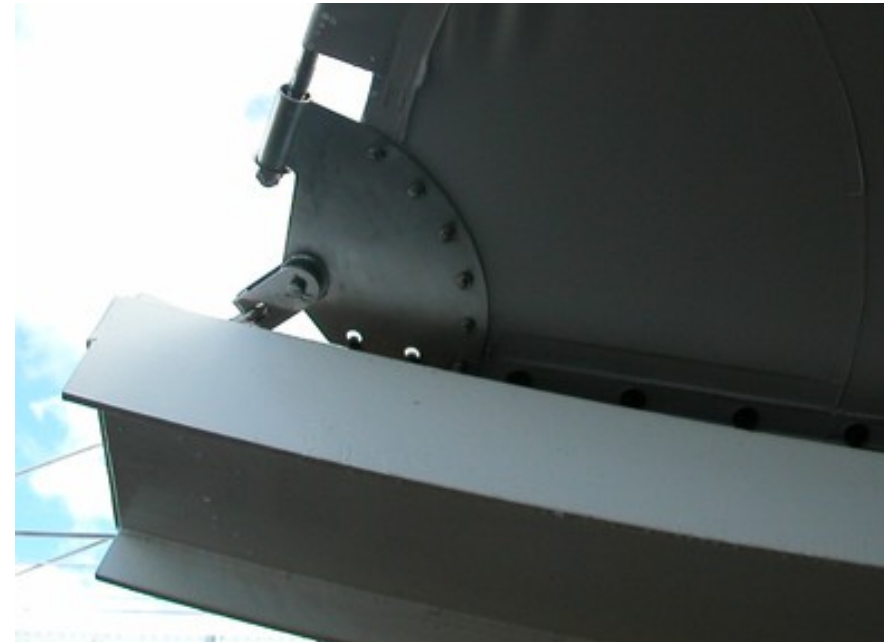
► Pointe de toile



Style français : plaque à jumelles

Détails

► Pointe de toile



Style français : plaque à jumelles

Détails

► Pointe de toile



Style français : plaque à jumelles
Almunecar Aquarium Espagne



Détails

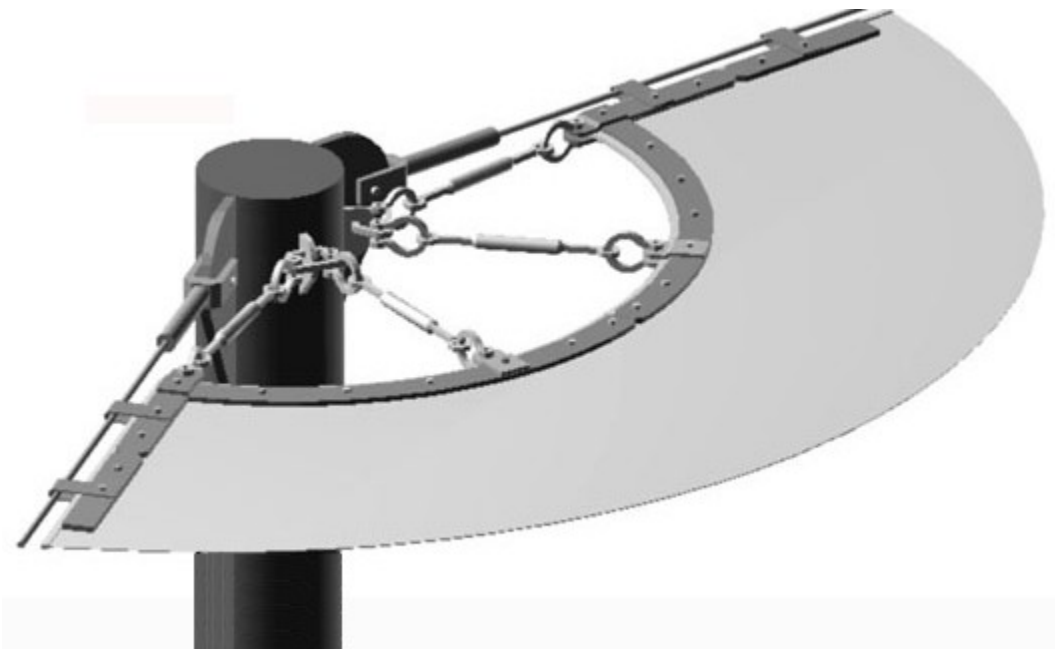
► Pointe de toile



Style français : plaque à jumelles

Détails

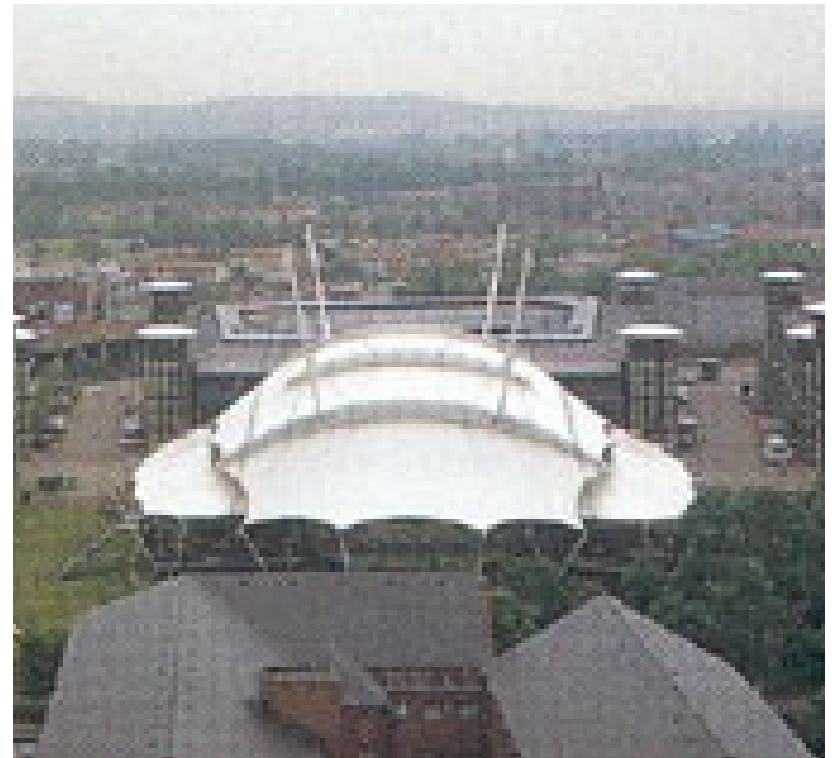
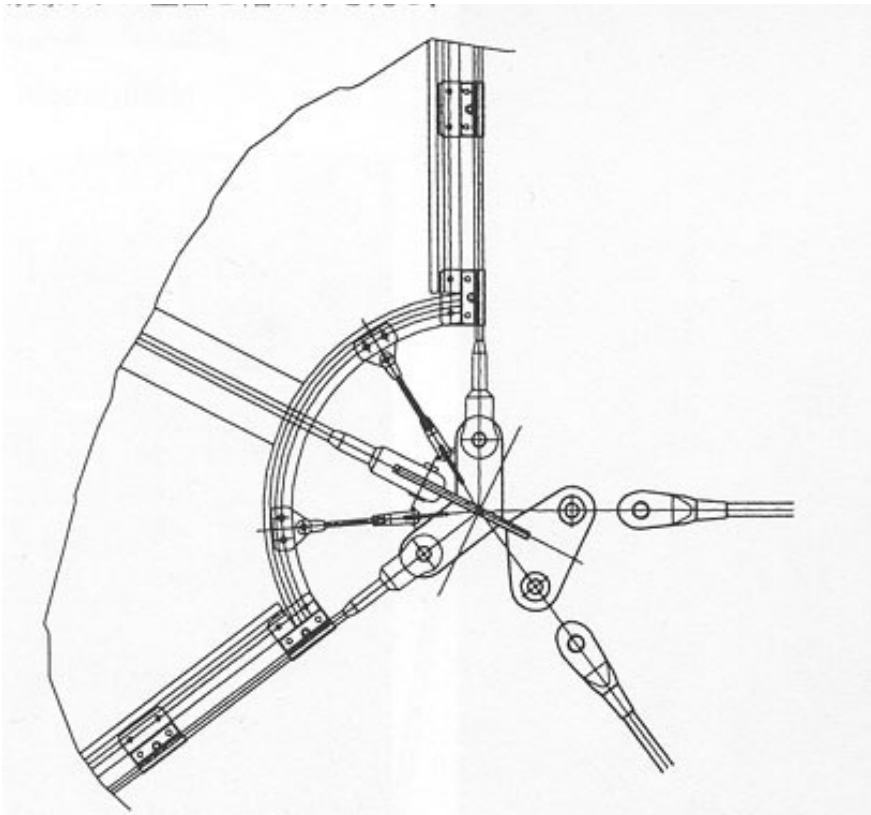
► Pointe de toile



Style anglais - détail Arup + Hopkins - Edinbourg

Détails

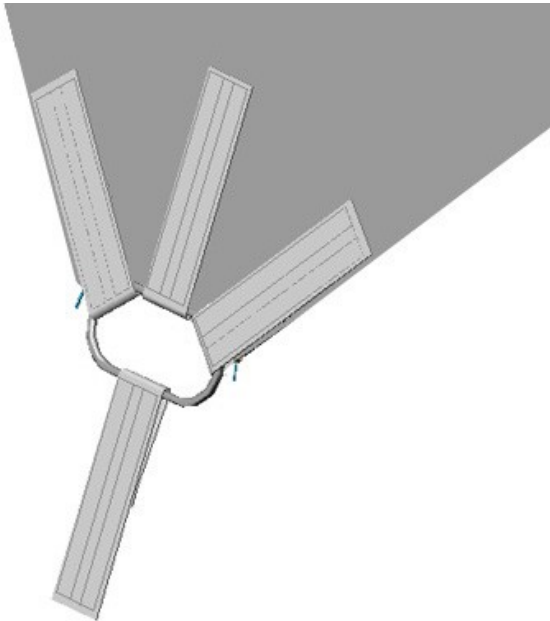
► Pointe de toile



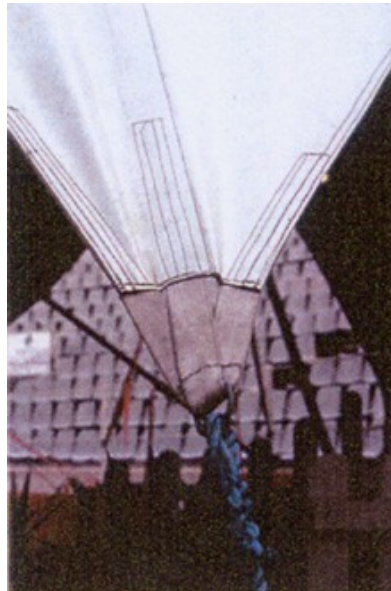
Style anglais - détail Arup + Hopkins - Nottingham

Détails

► Pointe de voile



Pointe textile

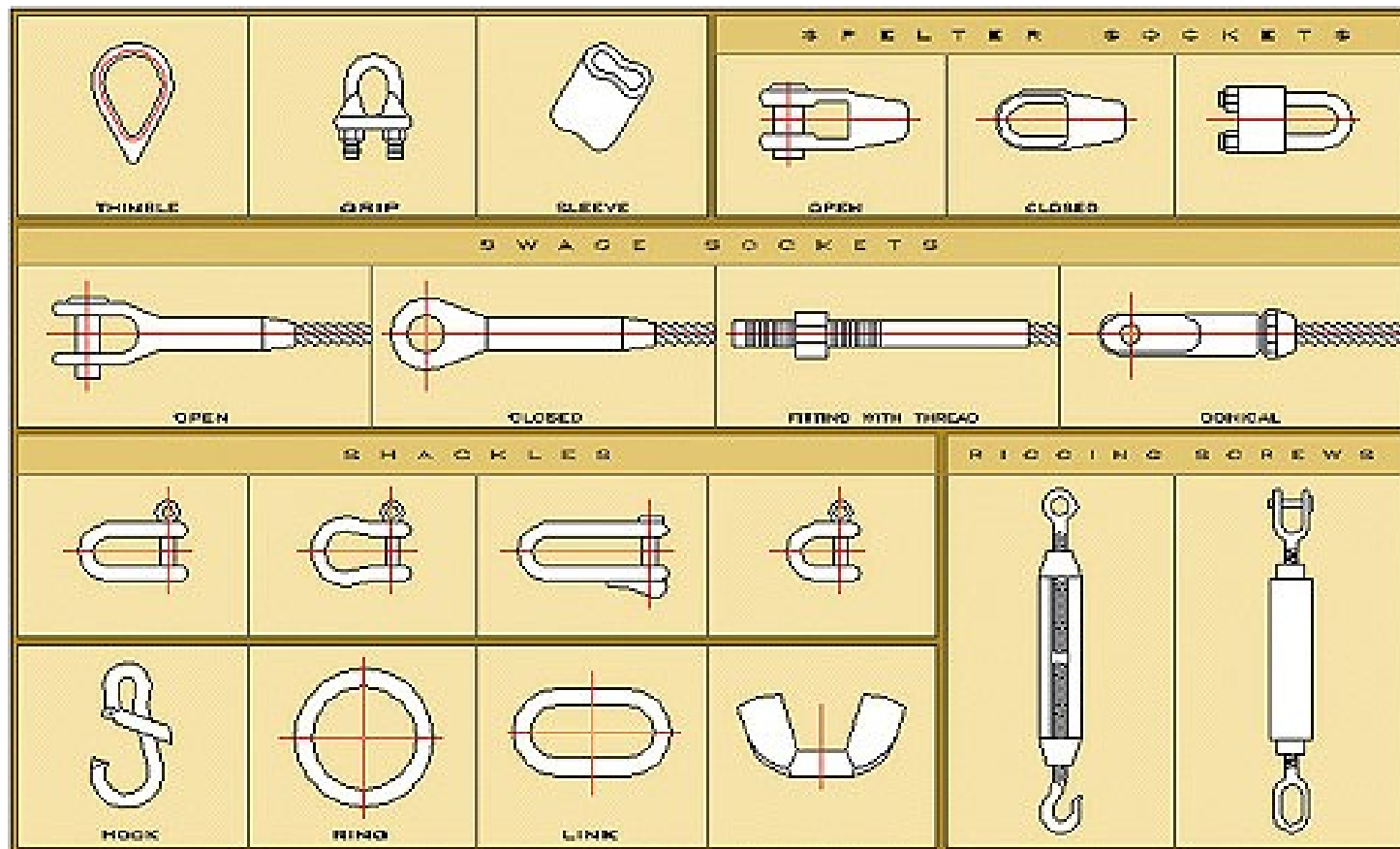


De Prestigte Wildernis -Belgique



Détails

► Accastillage



Détails

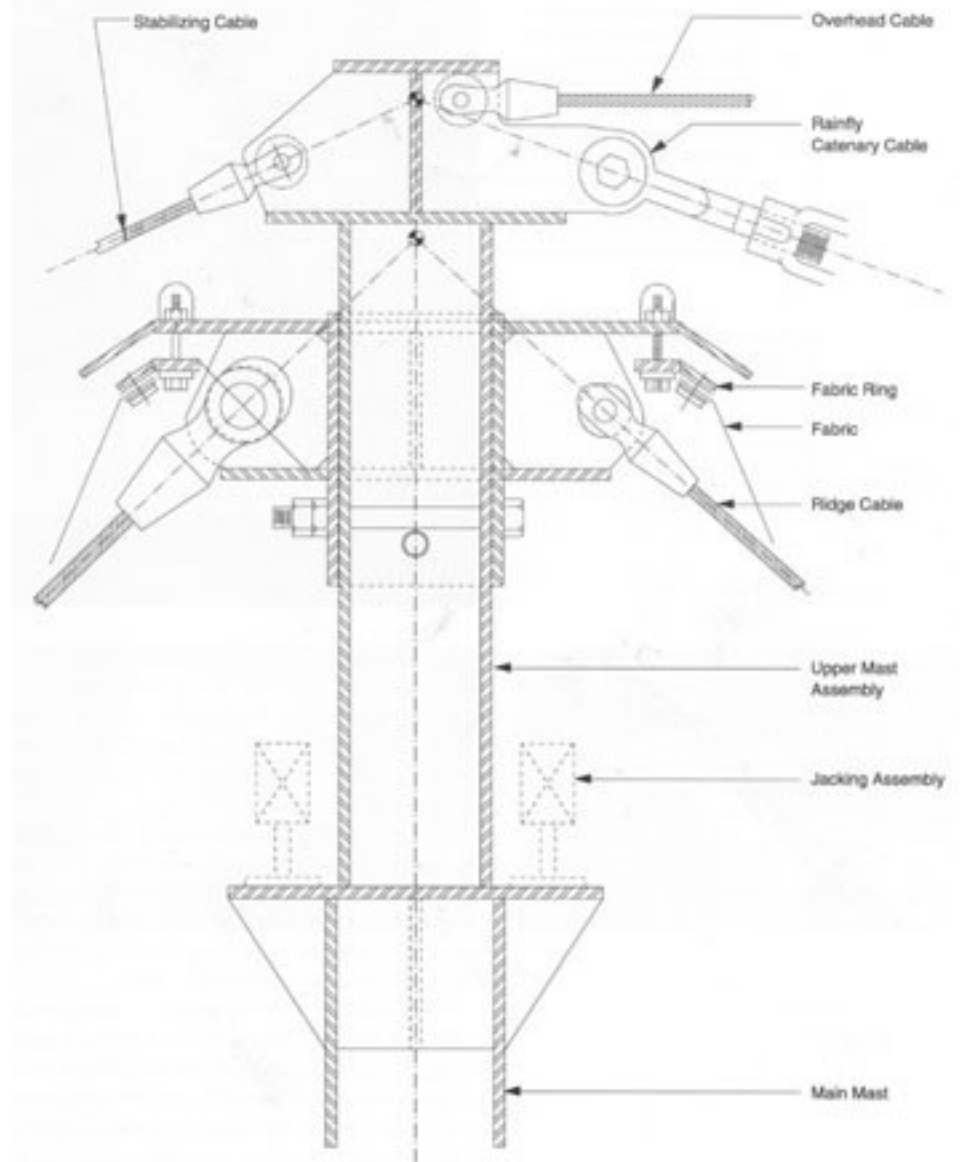
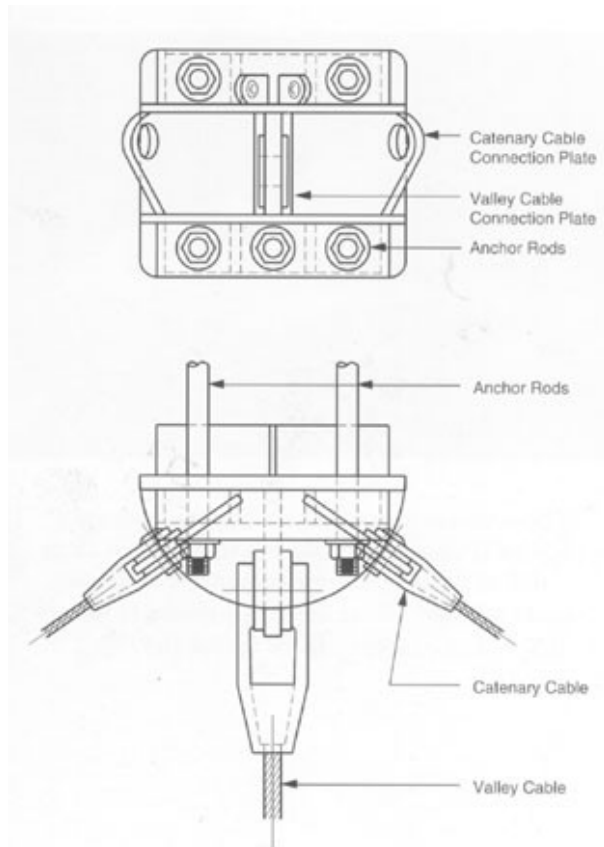
► Accastillage



San Diego Convention Center - H. Berger - USA 1985

Détails

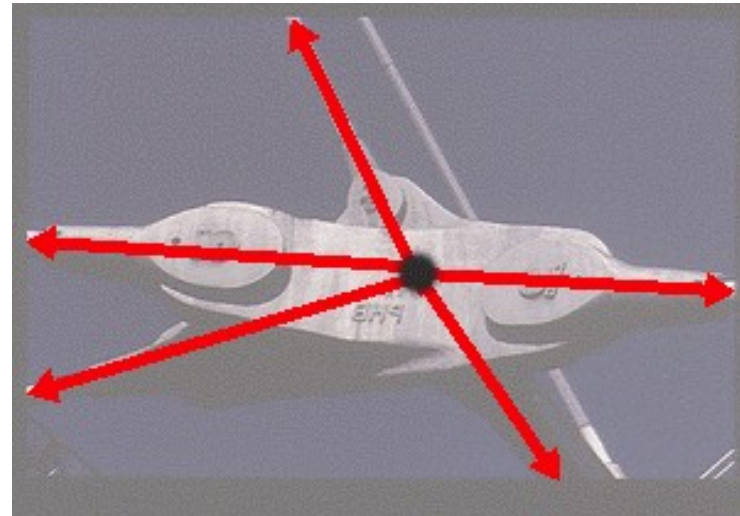
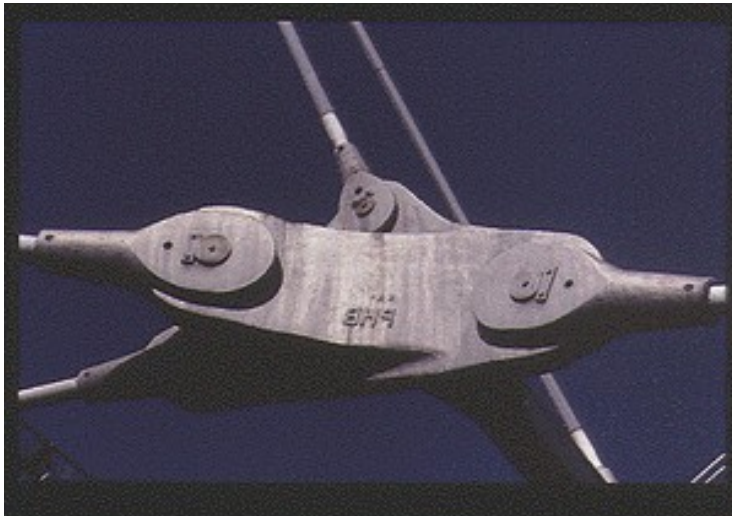
► Accastillage



San Diego Convention Center - H. Berger - USA 1985

Détails

► Accastillage

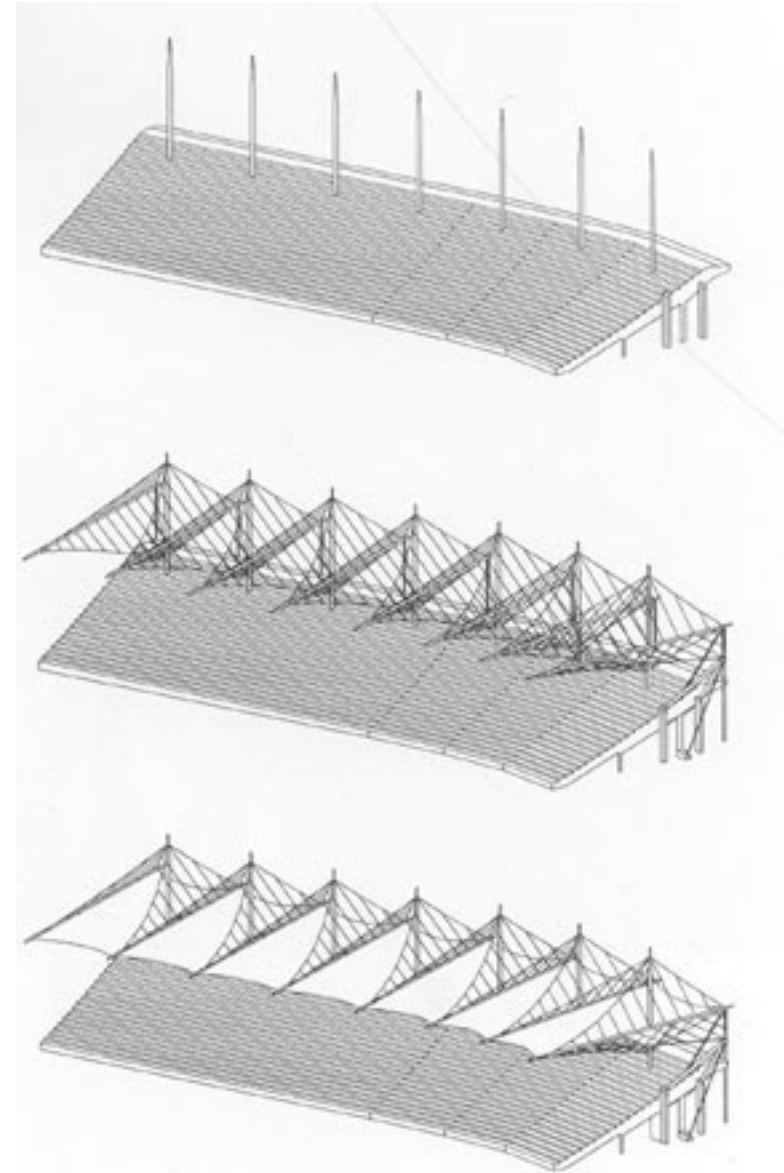


Stade Olympique de Munich - F.Otto - 1972

► Haubanages, ancrages, pieds de poteaux...

Montage

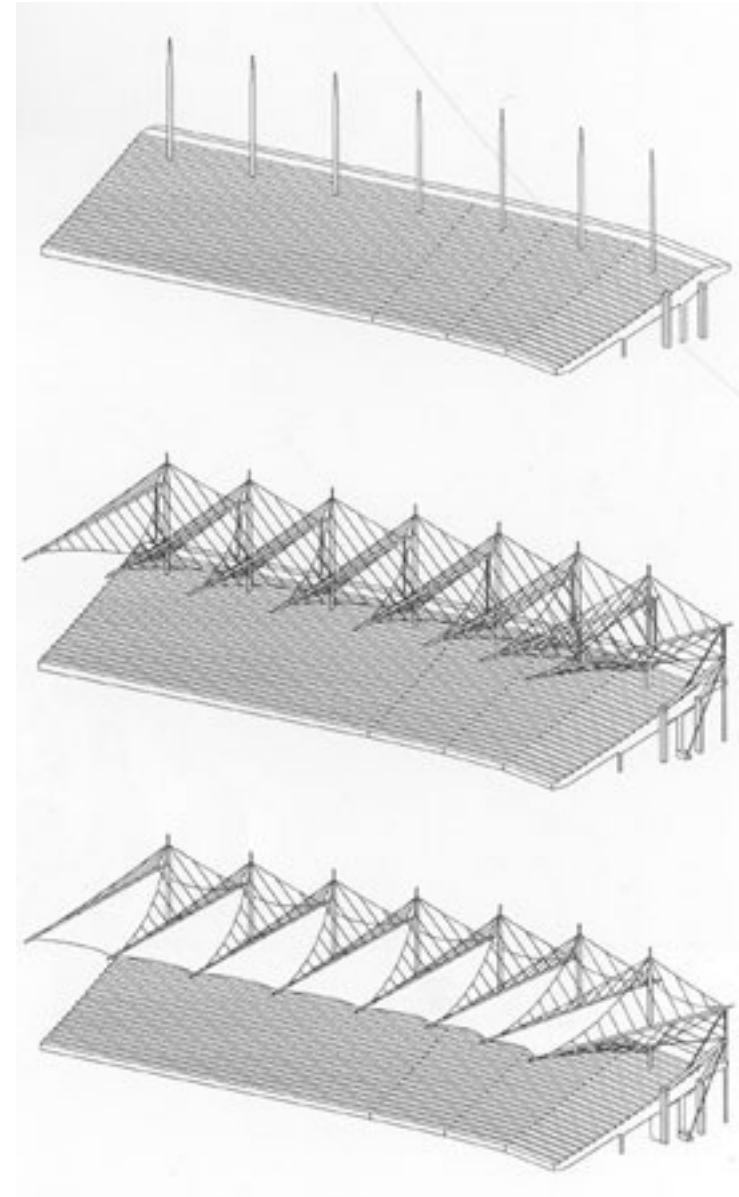
- ▶ Phasage et stabilité de la structure porteuse



Grand Stand – Schlaich Bergemann & Partners – Allemagne - 1995

Montage

- ▶ Phasage et stabilité de la structure porteuse
 -▶ Mâts et câbles à longueurs fixes (pas de réglage - tolérance 10mm sur massif et 5mm mât)
 -▶ Préassemblage sur site membrane, câbles et éléments de compression
 -▶ Levage et fixation câbles
 -▶ Fixation stabilisations horizontales – Prétension câbles (150KN) – contrôle géométrie et prétension
 -▶ Prétension toile en point bas
 -▶ Ajustement stabilisations horizontales
 -▶ Fixation gouttières en points bas



Conclusion

Conclusion

- ▶ Règles de conception de l'esquisse à la réalisation
- ▶ Tour d'horizon des différentes typologies
- ▶ Conception de 2 projets
 -▶ Toile
 -▶ Gridshell



Serpentine Pavillon - Lilas 2007 – Zaha Hadid 2007

Conclusion



Serpentine Pavillon - Lilas 2007 – Zaha Hadid 2007



Serpentine Pavillon - Lilas 2007 – Zaha Hadid 2007



Serpentine Pavillon - Lilas 2007 – Zaha Hadid 2007