

# Construire le Courbe

Cyril Douthe – Lionel Du Peloux – Romain Mesnil  
[romain.mesnil@enpc.fr](mailto:romain.mesnil@enpc.fr)



# Gridshells rigides: matérialiser la double courbure



# Plan

1. Introduction
2. Historique et démarche de conception
3. Détails constructifs: géométrie
  1. Vêture
  2. Nœuds
4. Technologie
5. Prototype Gridshell rigide ENPC 2014



# 1. Introduction



# Mon parcours

## Ecole des Ponts

- 2009-2013: Elève Ingénieur Ecole des Ponts (GCC)
- 2011-2012: Année de césure à Leicht GmbH

## Massachusetts Institute of Technology

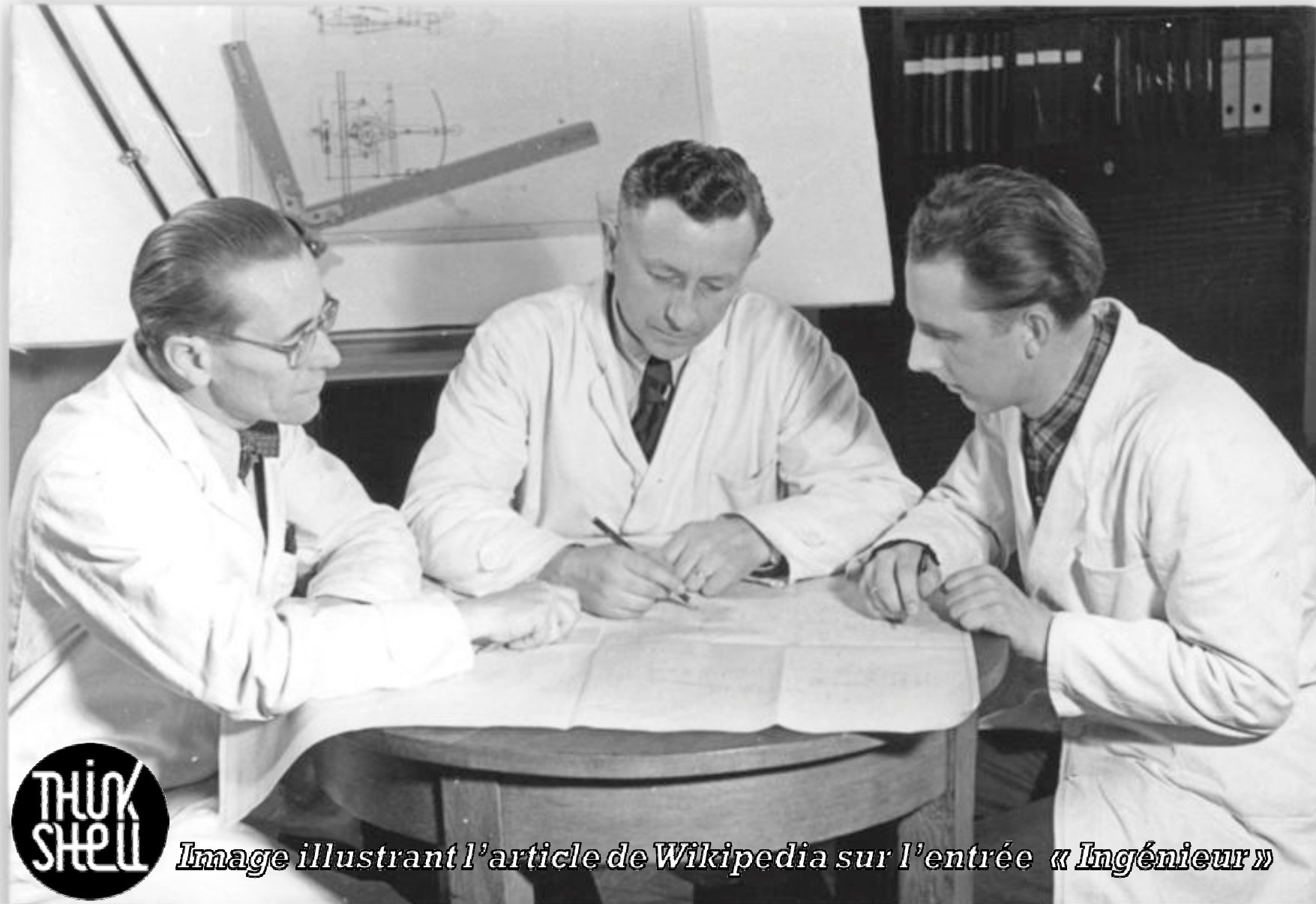
- 2012-2013: Master of Engineering in Civil Engineering
- 2013: Mémoire sur le flambement des grid shells

## Bouygues/UR Navier

- Depuis 2013: Doctorant sur la conception de structures à géométries complexes



# Qu'est-ce qu'un ingénieur?



*Image illustrant l'article de Wikipedia sur l'entrée « Ingénieur »*



# Quelques remarques et questions

- Que feront les ingénieurs à l'avenir?
- Des personnes capables de réfléchir et d'émettre un jugement seront toujours de valeur
- Les personnes qui produisent des tâches répétitives aujourd'hui seront obsolètes demain



Bundesarchiv, Bild 103-23005-1005  
Foto: Bittling | 18. März 1954



# Quelques remarques et questions

- Aujourd'hui, un ingénieur peut calculer mille fois plus vite qu'il y a 50 ans grâce à l'ordinateur
- Un ingénieur chinois ou indien peut faire ce que nous faisons et coûte 10 fois moins cher
- Quelle est notre valeur aujourd'hui? Et demain?



Bundesarchiv, Bild 103-23005-1000  
Foto: Bitting | 18. März 1954





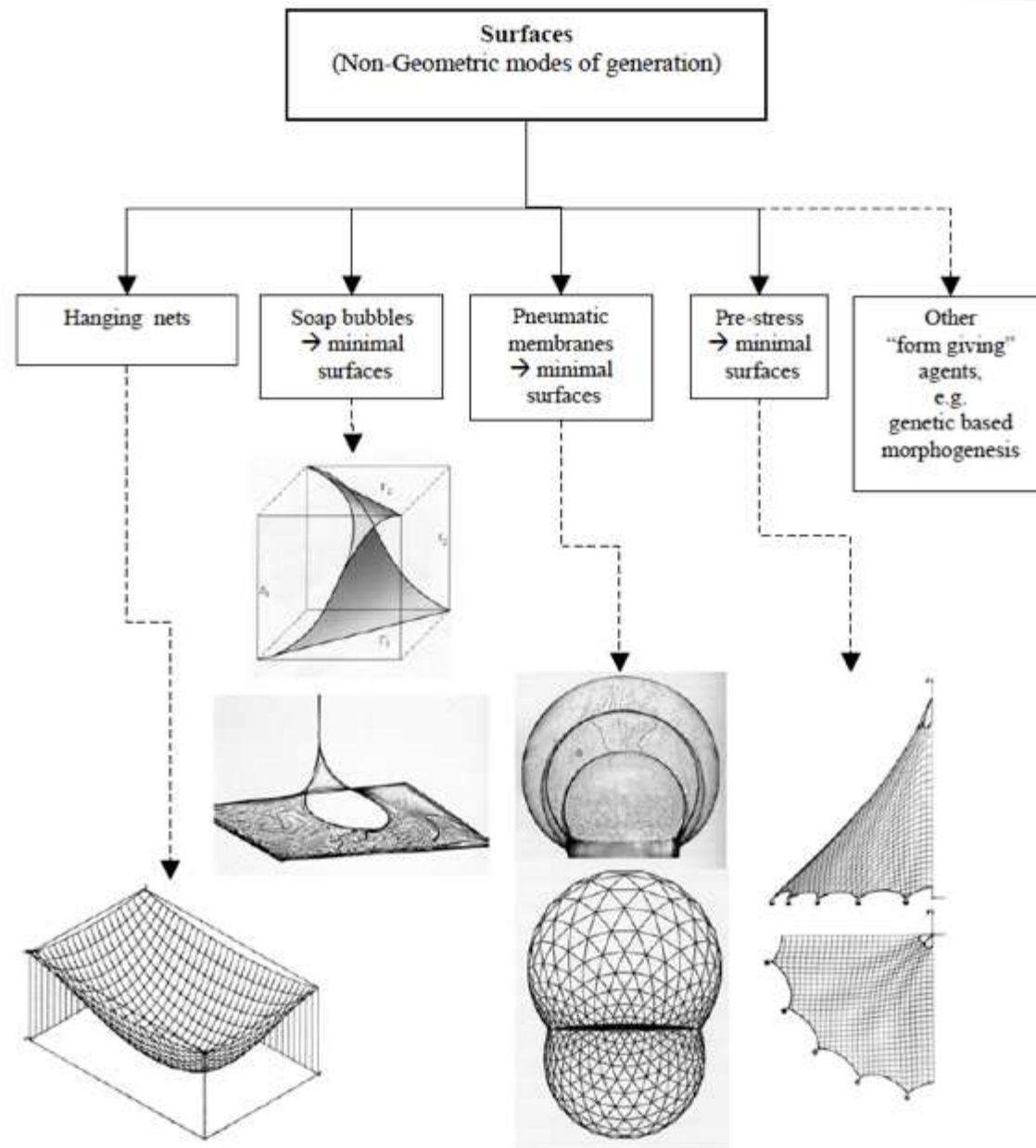
# Approches conceptuelles pour la conception de structures complexes



# Approches de morphogénèse structurelle

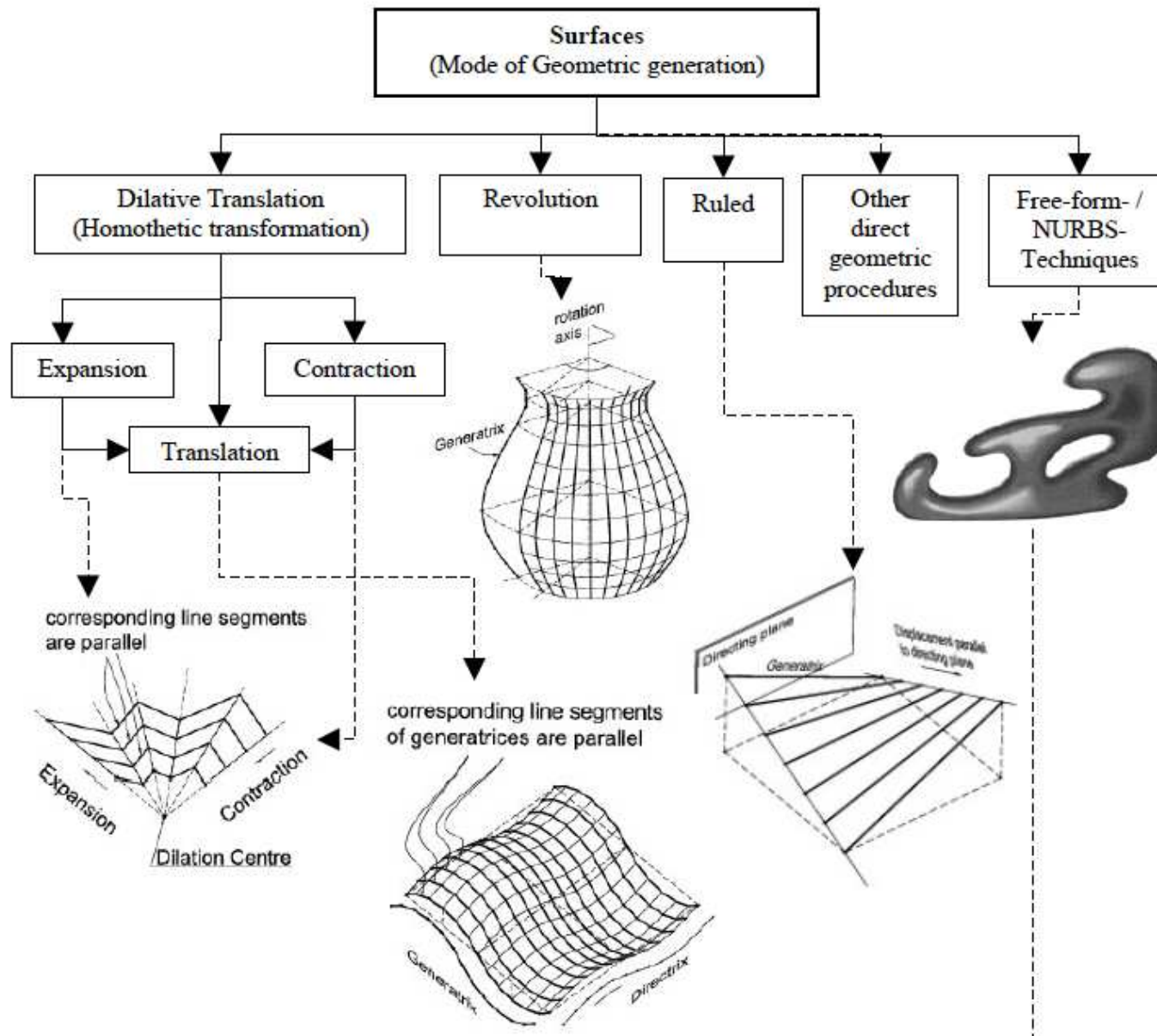
- Trois grandes familles de génération de forme
  - Formes géométriquement contrainte
  - Formes mécaniquement contrainte
  - Formes flexibles
- Différents niveaux de compréhension de la structure
  - Contraintes technologiques (économie du projet)
  - Contraintes structurelles
  - Contraintes architecturales





*Principes mécaniques de génération de surfaces (Stefan 2004)*

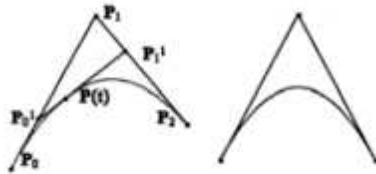




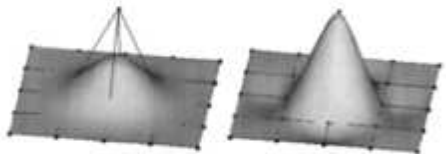
*Principes géométriques de génération de surfaces (Stefan 2004)*



Basic lines and curves  
(arcs, splines.)



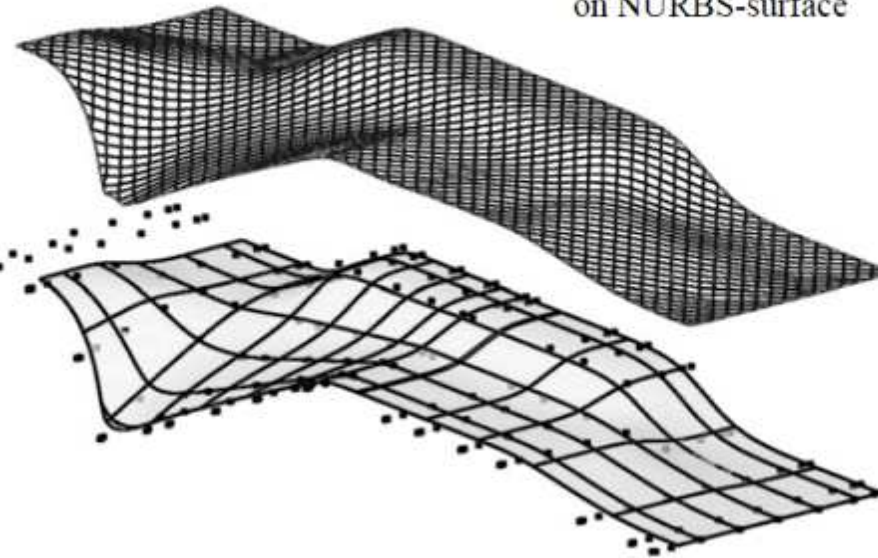
Simple surface patches,  
with control points and  
polygons



Basic  
NURBS-  
Elements

NURBS-  
Surfaces

Regular grid mapped  
on NURBS-surface



Complex NURBS-surface composed of patches,  
shown with control points and control polygons



*Principes de génération de surfaces libres (Stefan 2004)*

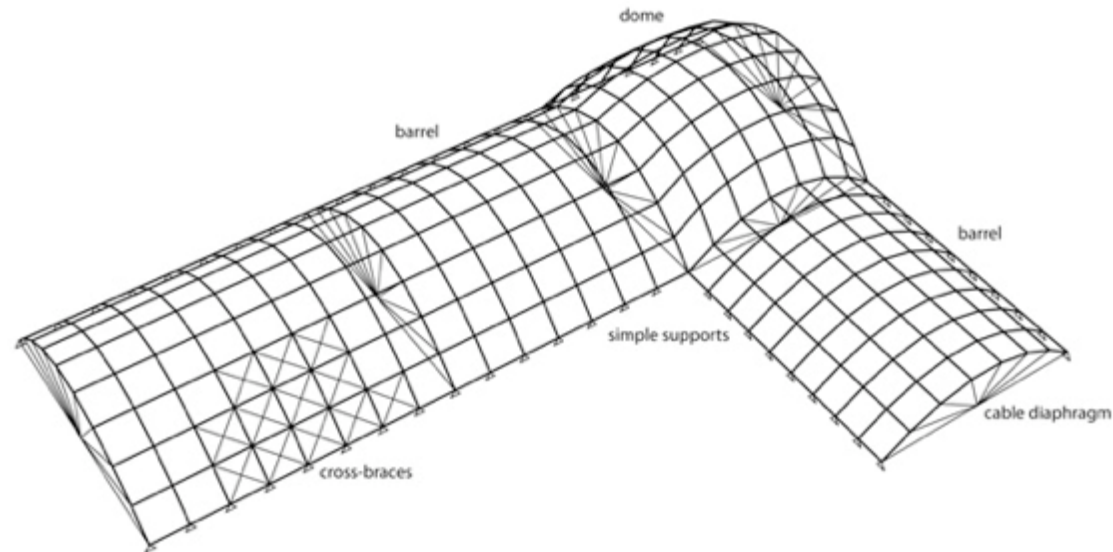


## 2. Historique et démarche de conception



# Gridshell à simple courbure

- Cour du musée de l'histoire de la ville de Hambourg (1989)
- Ingénieur: Schlaich Bergermann und Partner
- Architectes: gmp Architekten und Volkwin Marg



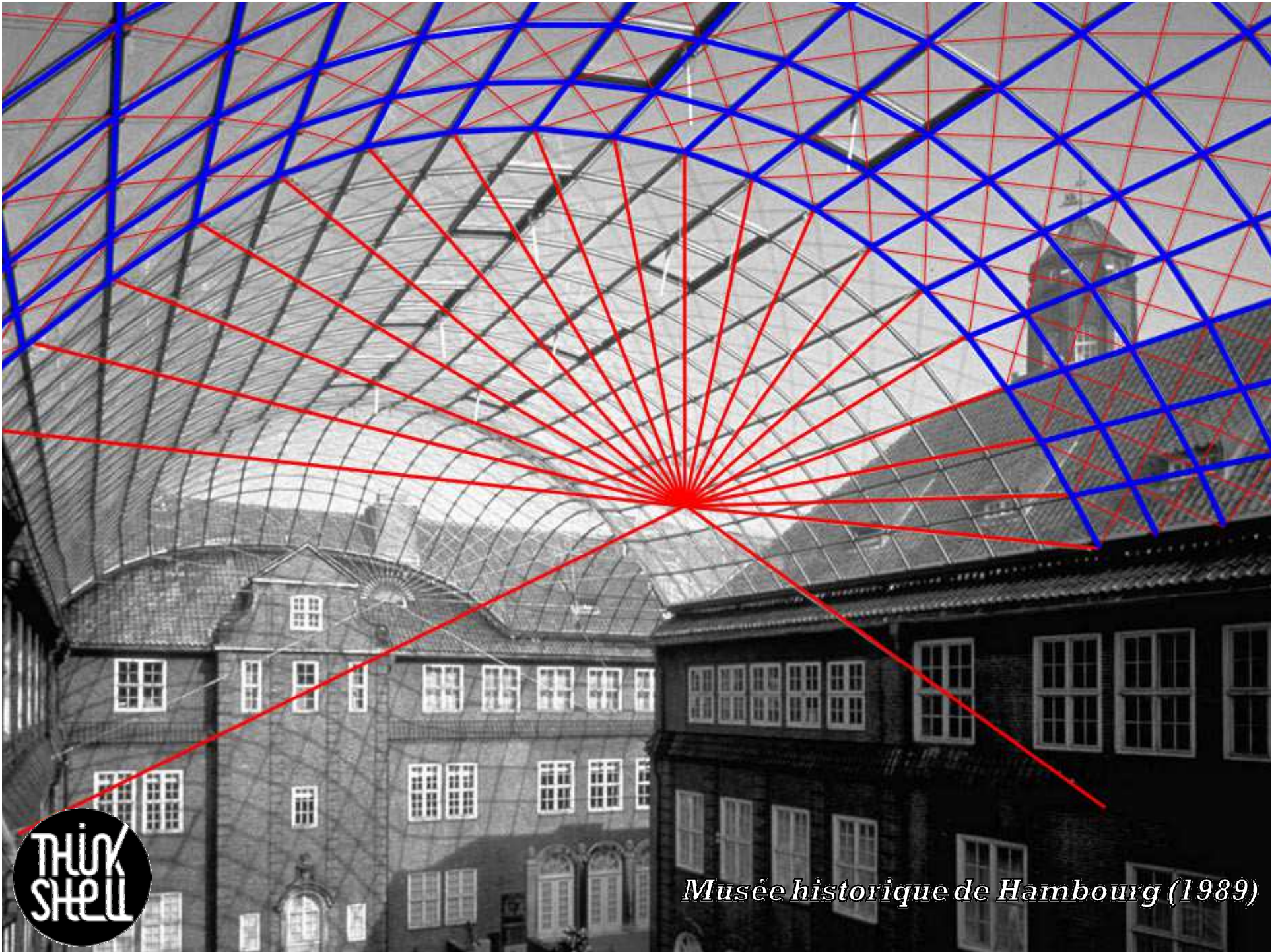
<http://shells.princeton.edu/Ham.html>





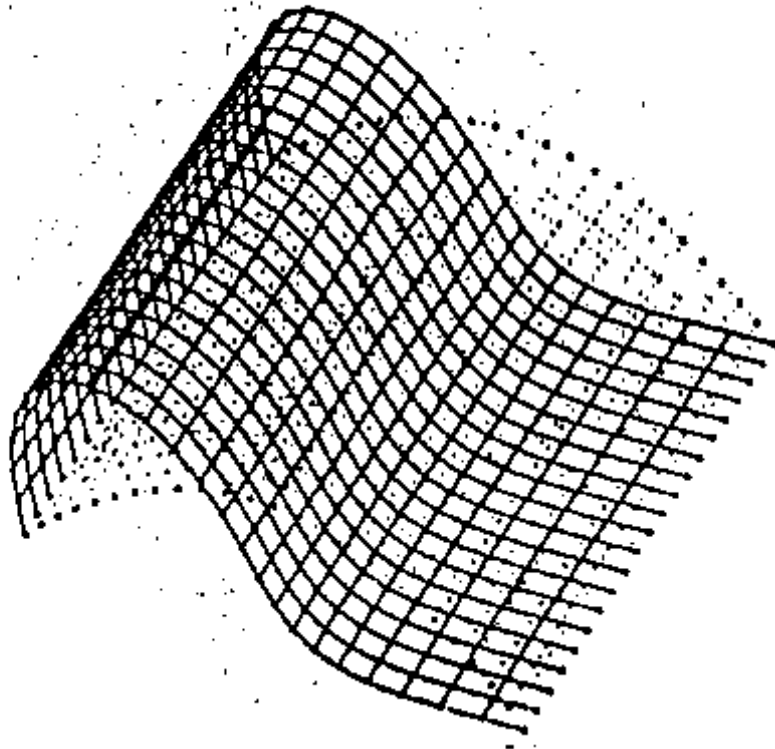
*Musée historique de Hambourg (1989)*



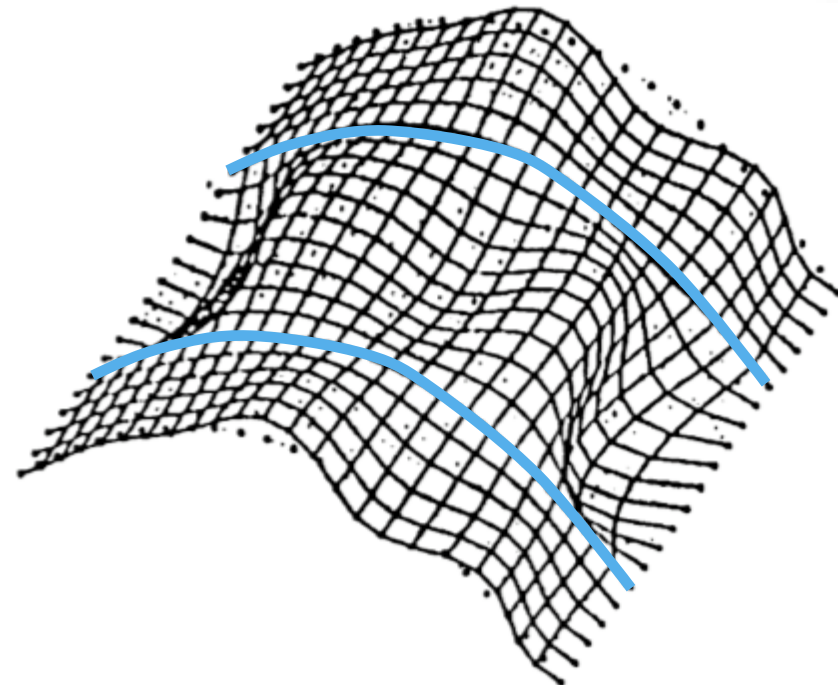


*Musée historique de Hambourg (1989)*

# Importance des conditions aux limites



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

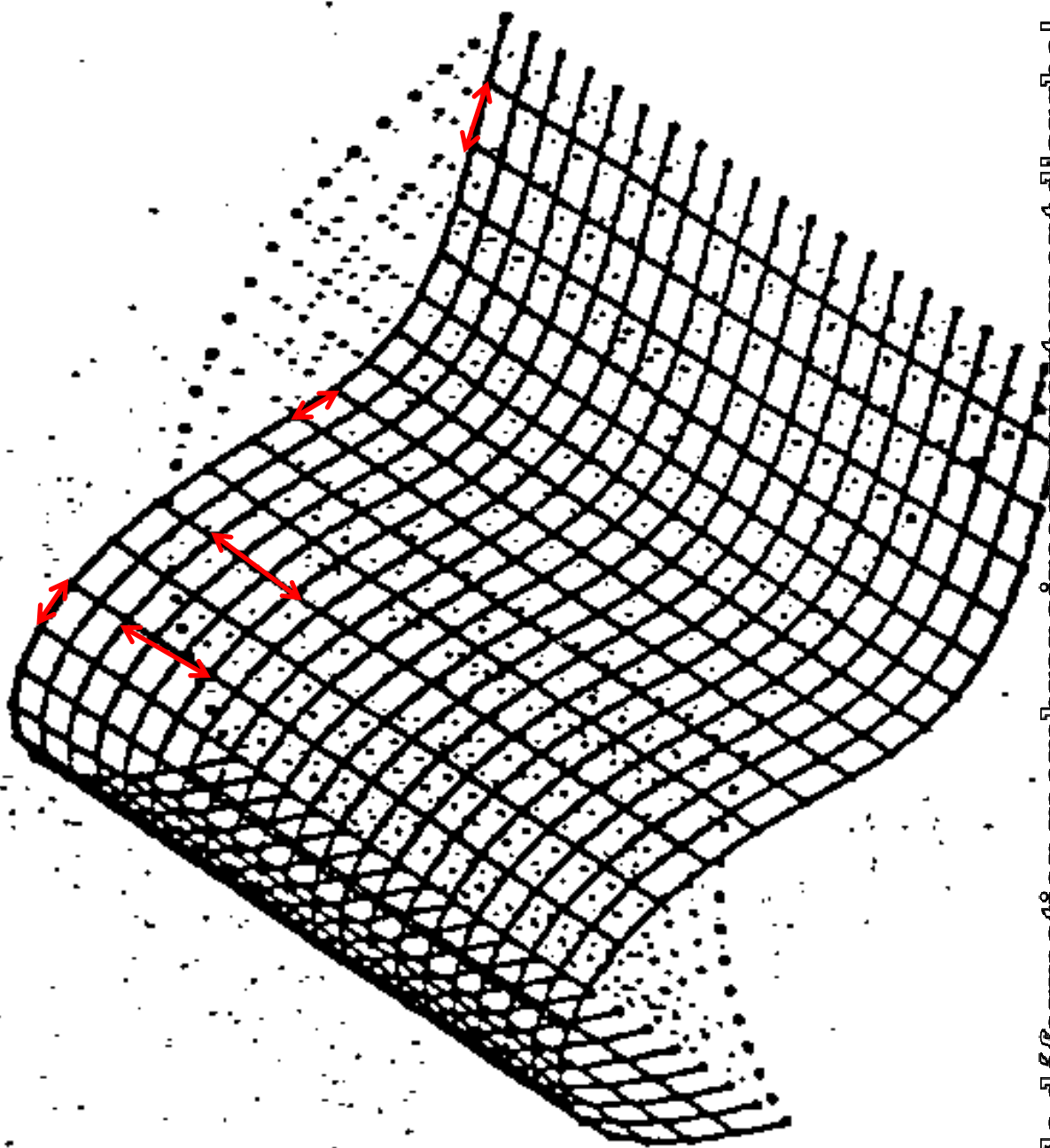


**1<sup>er</sup> mode de flambement, avec  
arches rigides (Bulenda)**



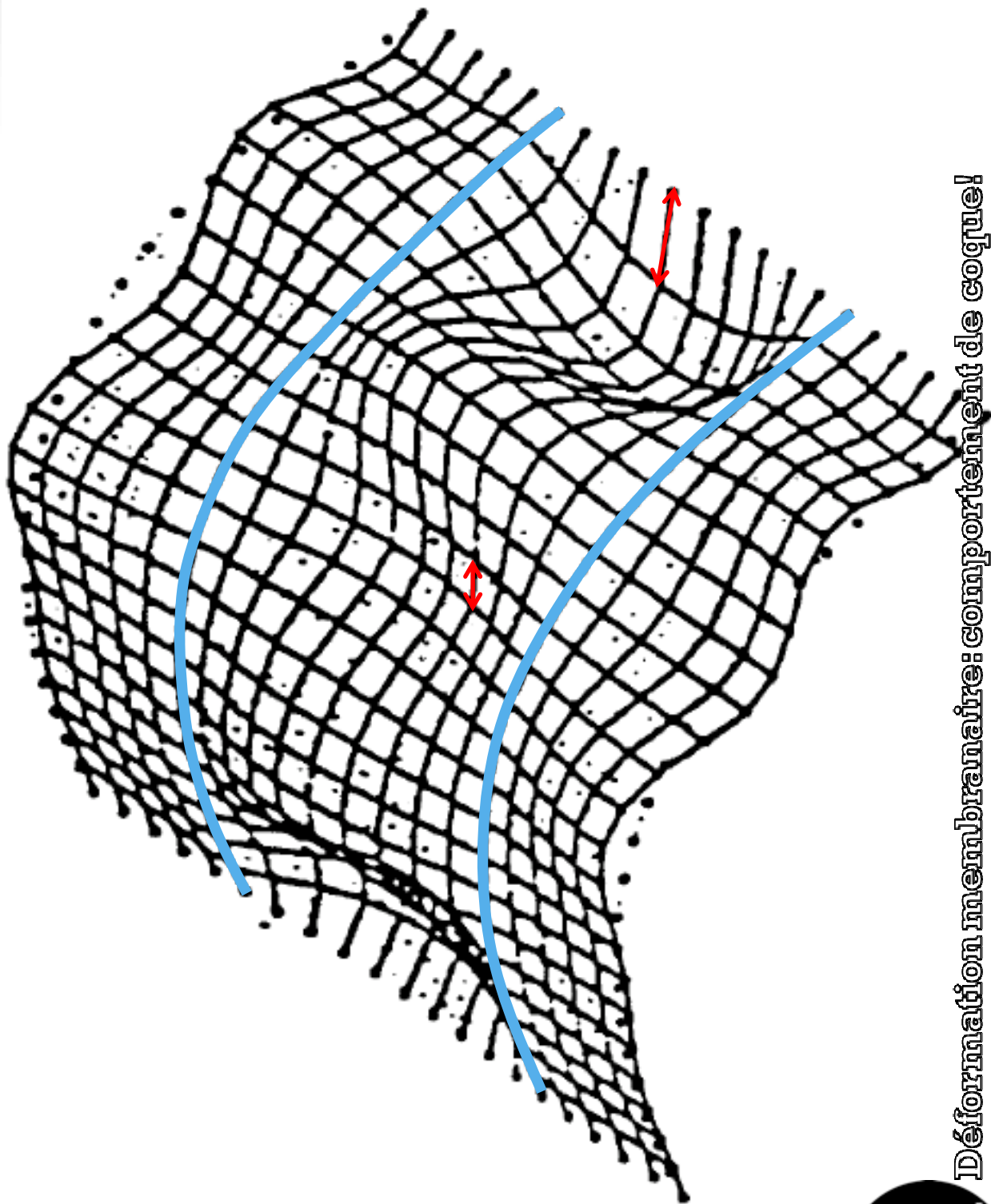
**NB: contreventement non représenté**





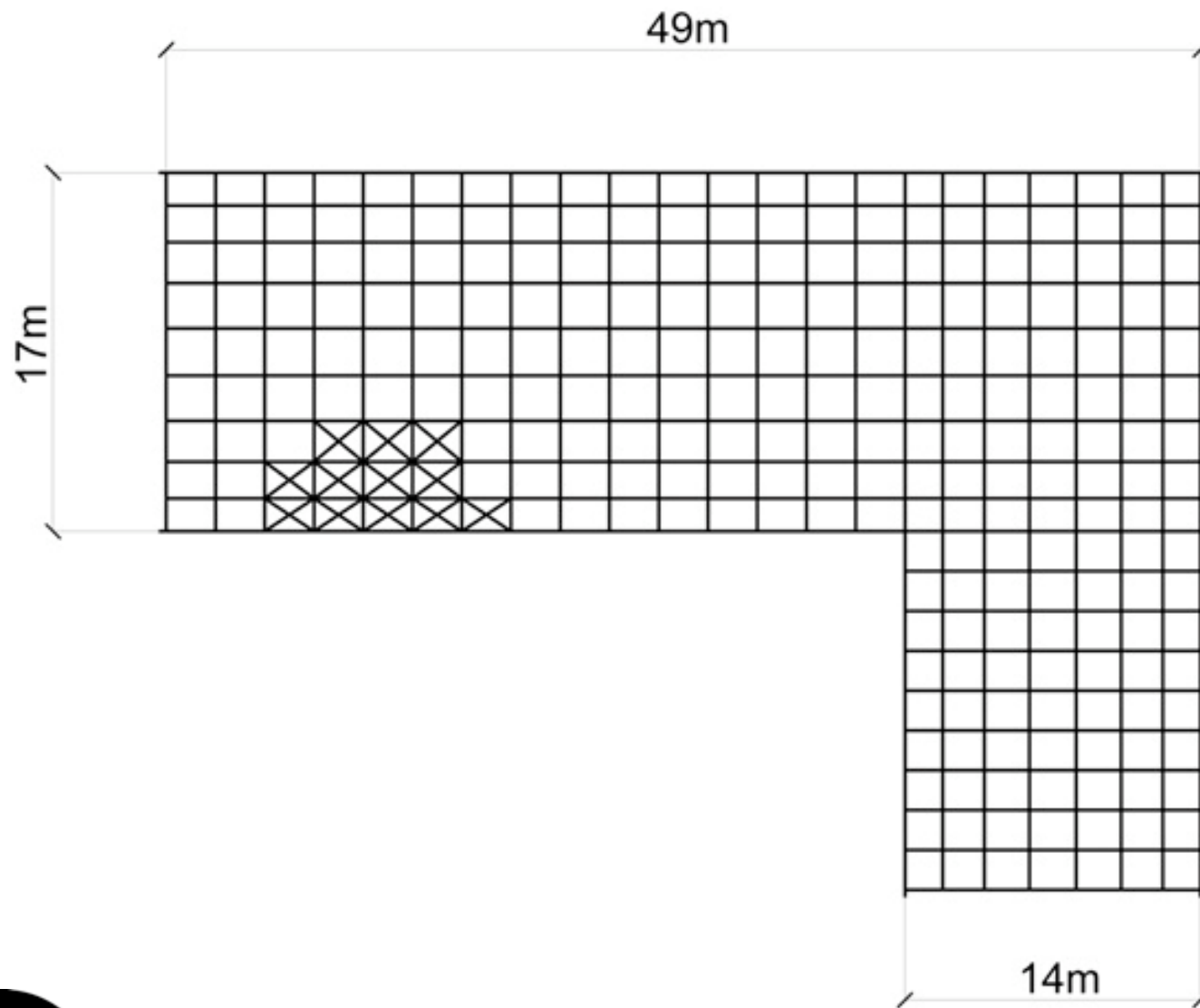
Pas de déformation membranaire: comportement d'arche!





Déformation membranaire: comportement de coque!

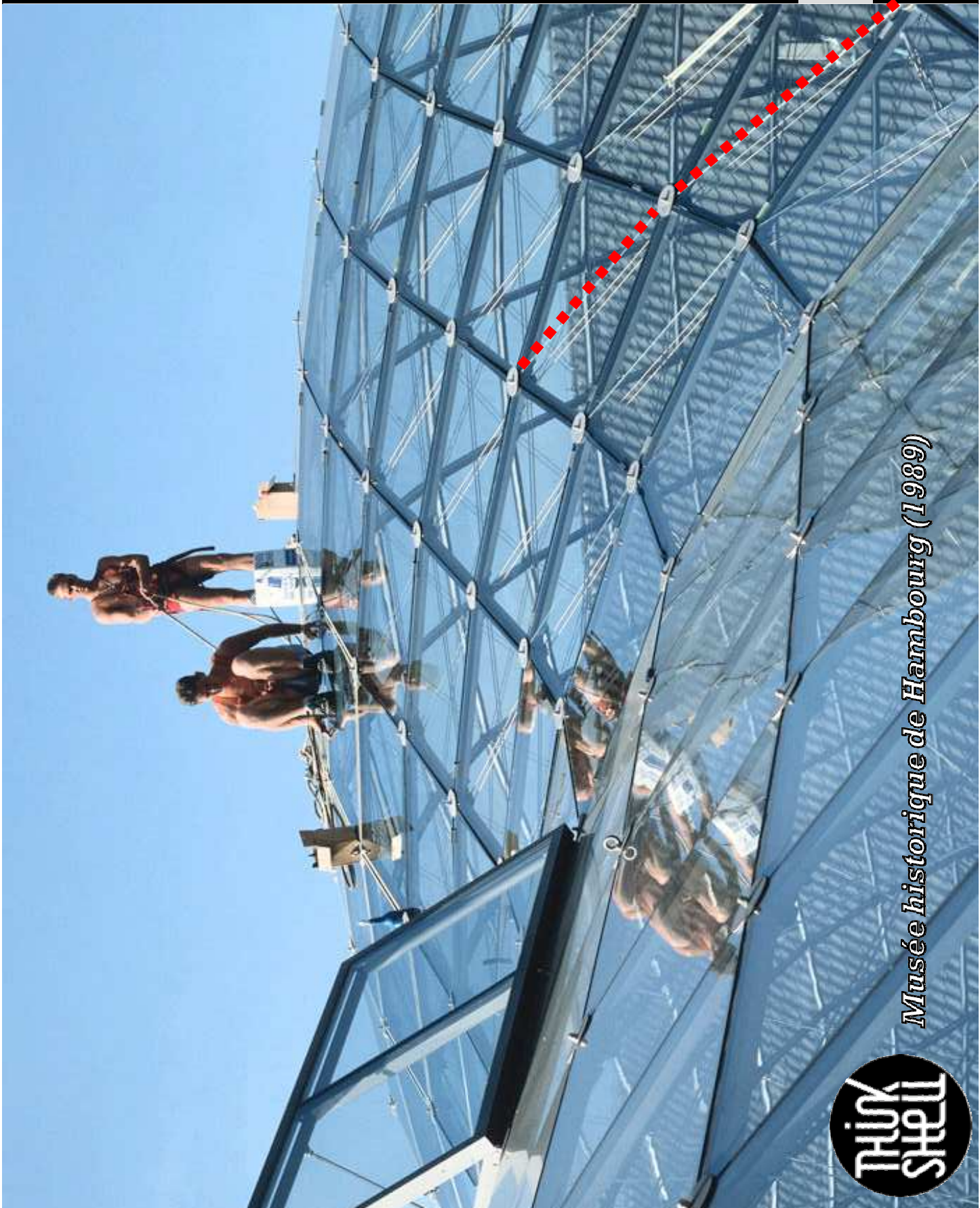




<http://shells.princeton.edu/Ham.html>



*Musée historique de Hambourg (1989)*



# Grid shell à double courbure

- Maison des hippopotames, Zoo de Berlin (1996)
- Architecte: J. Gribl
- Ingénieur: Schlaich Bergermann und Partner
- Première application d'un principe de génération géométrique: les surfaces de translation



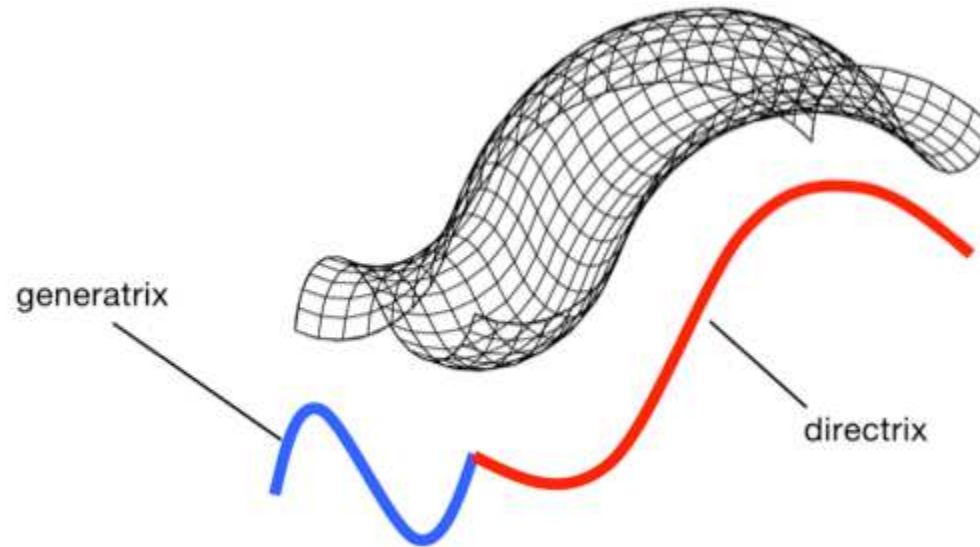


Vue extérieure (photo: [www.sbp.de](http://www.sbp.de))

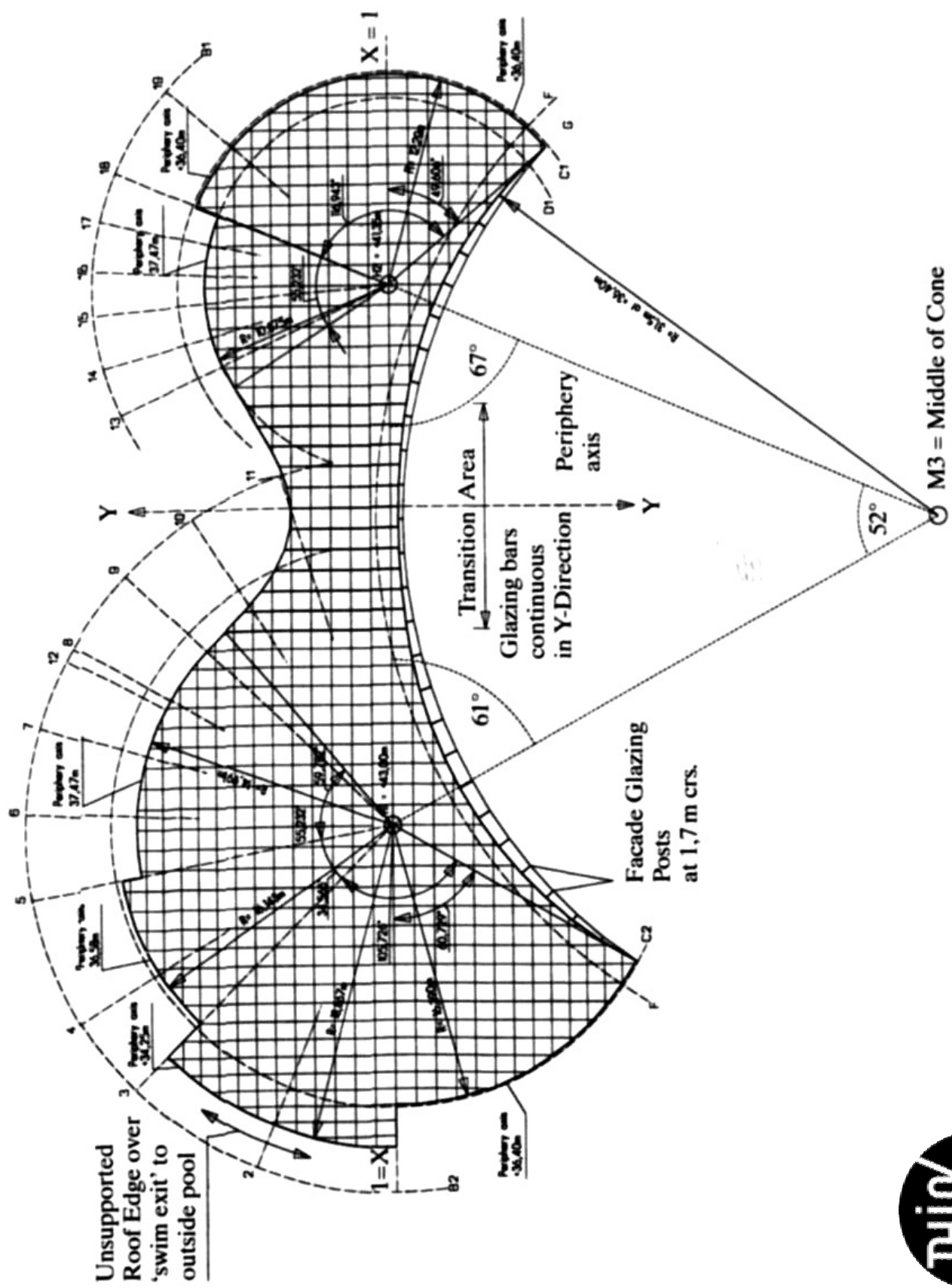


# Génération de surfaces de translation

- Premier exemple de forme libre à panneaux **quadrangulaires plans**
- Forme **géométriquement contrainte**
- Surface de translation

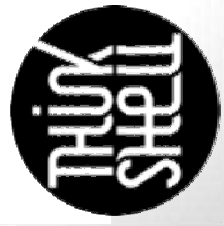


*Surface de translation (Glymph)*



Unsupported Roof Edge over 'swim exit' to outside pool

Principe de découpe

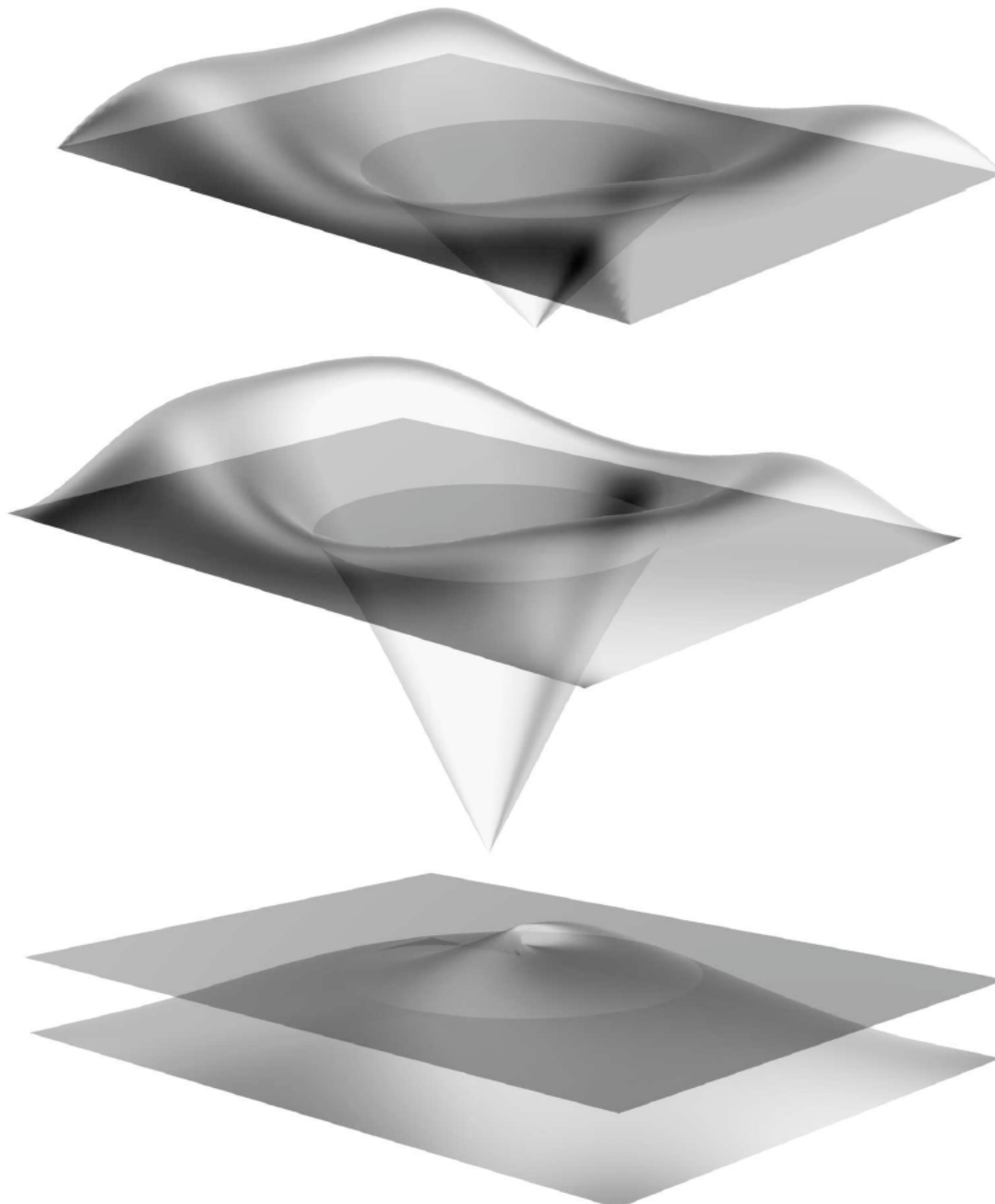


# Grid Shell à double courbure

- British Museum, London (2000)
- Architecte: Norman Foster
- BE: Buro Happold et Chris Williams (Bath University)
- Géométrie définie de façon analytique

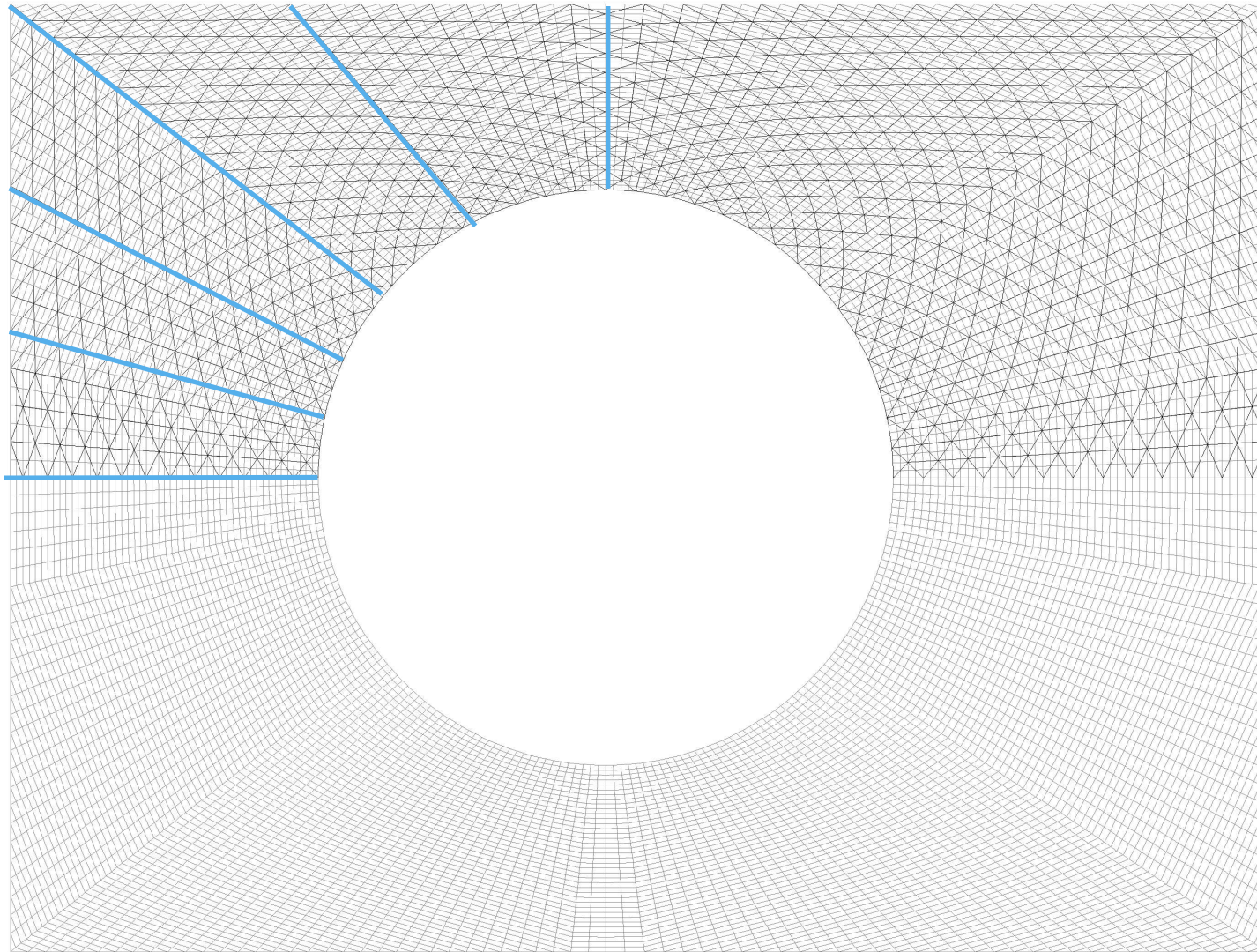






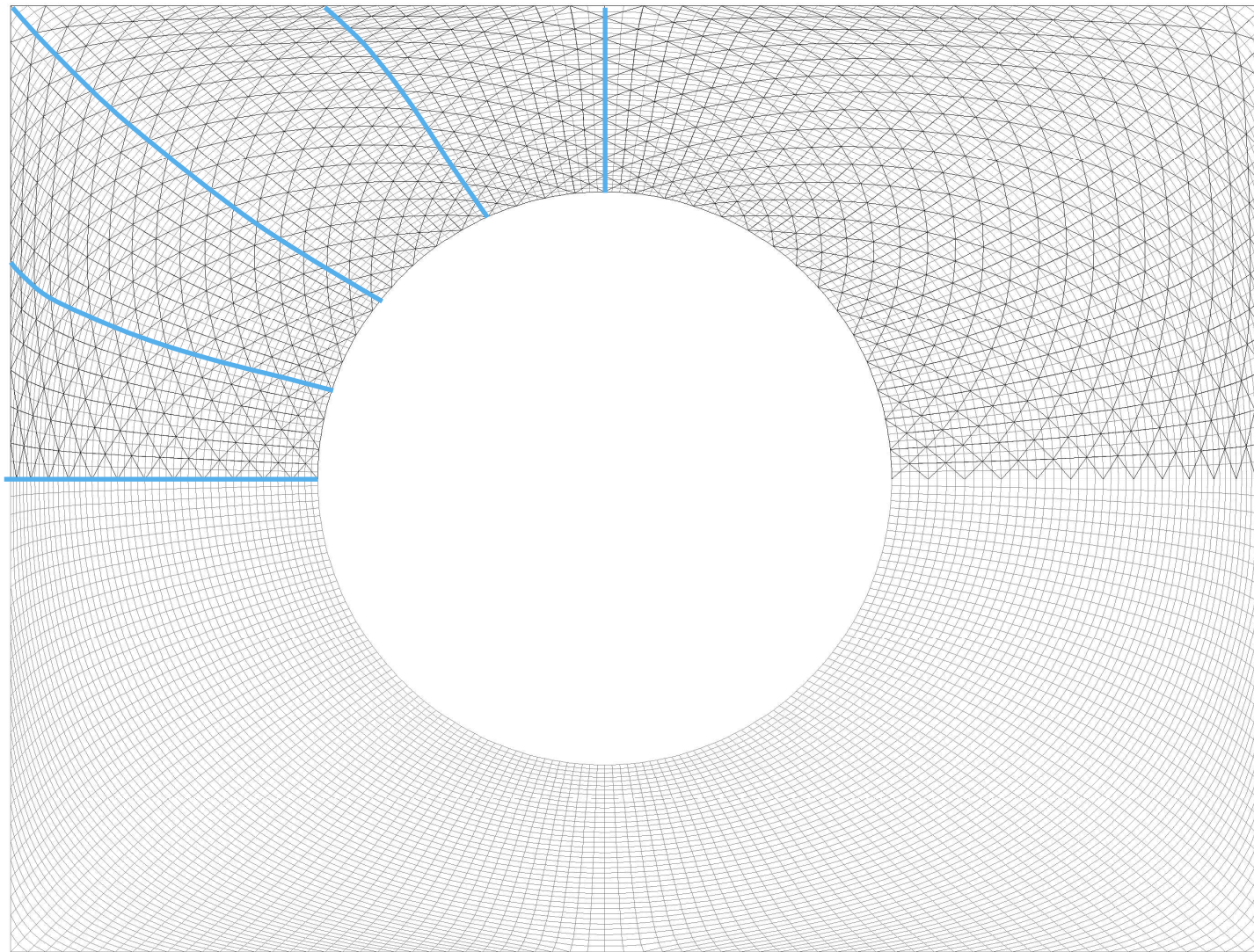
***Fonctions de base générant la forme voulue (Williams)***





***Grille de base générée sur le plan horizontal  
(vue en plan)***

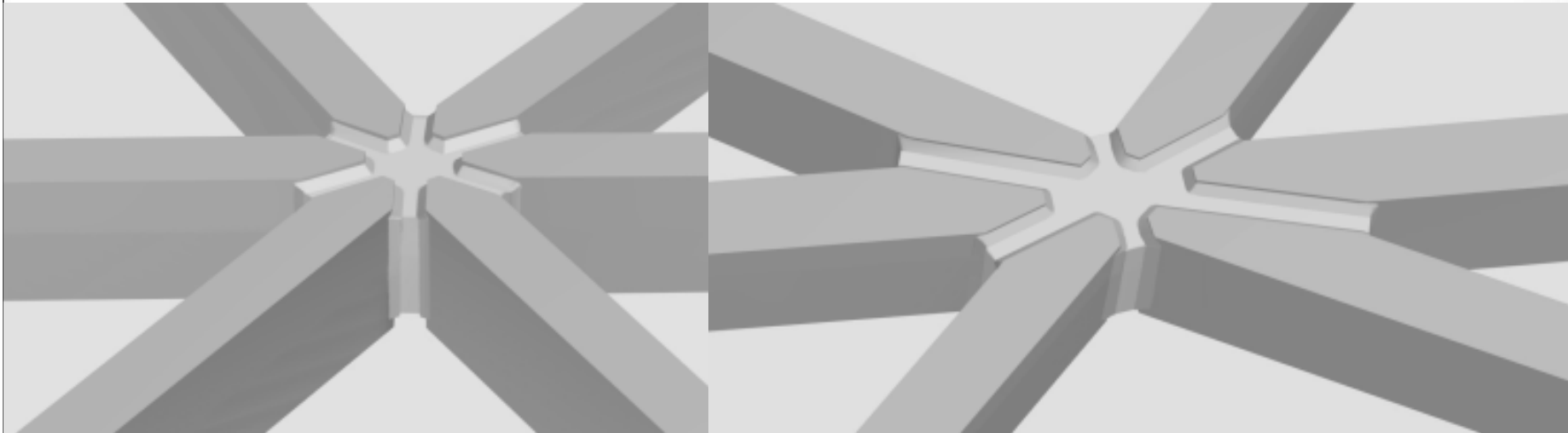




***Grille après relaxation vers une longueur de barre constante  
(vue en plan)***



# Qualité du maillage et nœuds



*Nœud « normal »*

*Nœud distordu*





# Géométrie des gridshells



# Géométrie de la vêtture

- **Topologie** des panneaux vs. Nœuds
  - Quelle valence de nœud pour quel type de face?
- **Panneaux plans**
  - Facteur de coût important: découpe vs. moule
  - Alternative: panneaux développables
  - Problème pour des panneaux non triangulaires



# Topologie de maillages

- Pour un polyèdre, rapport entre la connectivité et la topologie
  - Constante d'Euler polyèdre:  $V-A+F$
  - Constante d'Euler d'un solide:  $2-G$ , où  $G$  est le genre (nombre de trous)
- Exemples:
  - topologie du ballon de foot
  - Pôles Nord/Sud



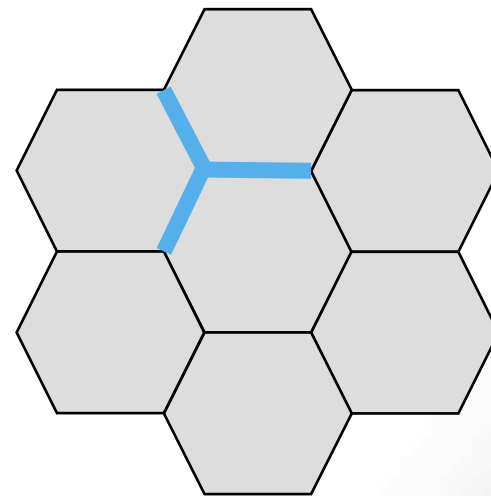
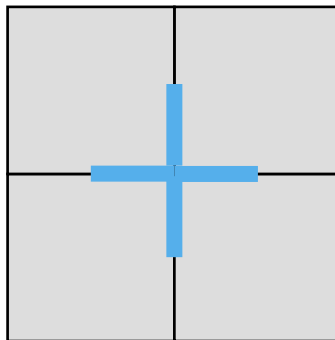
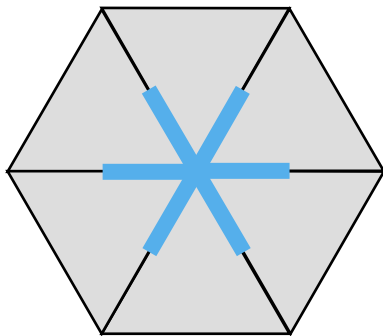


***Le maillage méridien/parallèles sur une sphère a deux points singuliers: les pôles!***



# Quelques résultats

- Un maillage **triangulaire** a une valence moyenne de **6**
- Un maillage **quadrangulaire** a une valence moyenne de **4**
- Un maillage **hexagonal** a une valence moyenne de **3**
- Pour mailler une forme complexe, il est souvent nécessaire d'ajouter des singularités



# Trouvez la singularité!



*The Blob (copyright: Joeren Hensen)*



# Trouvez la singularité!



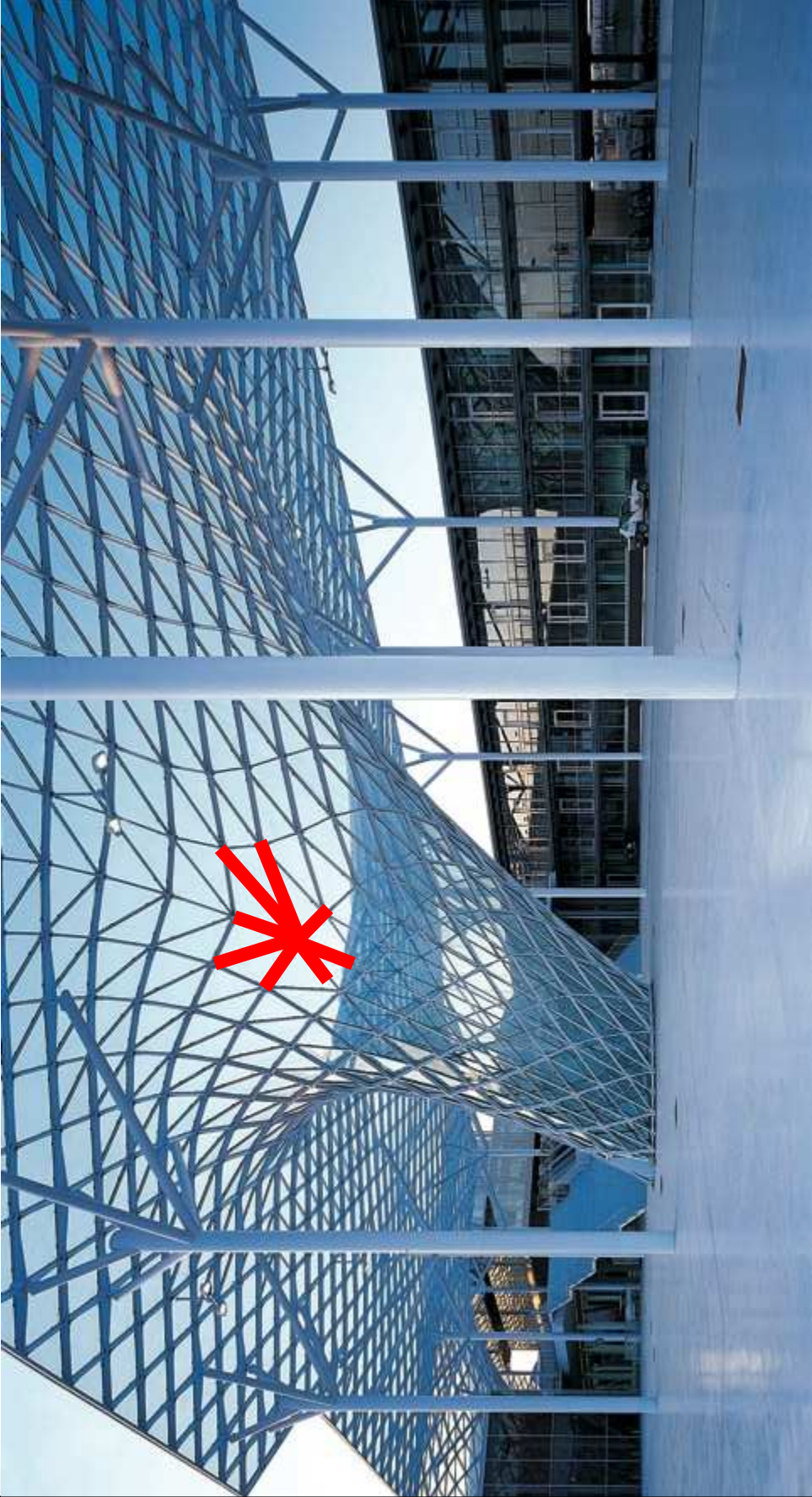
*The Blob (copyright: Joeren Hensen)*





*Milan Trade Fair (Fukzas/SBP)*





*Milan Trade Fair (Fulksas/SBP)*



*MyZeil (Fuksas/Knipplers Helbig)*





*MyZeil (Fuksas/Knipplers Helbig)*

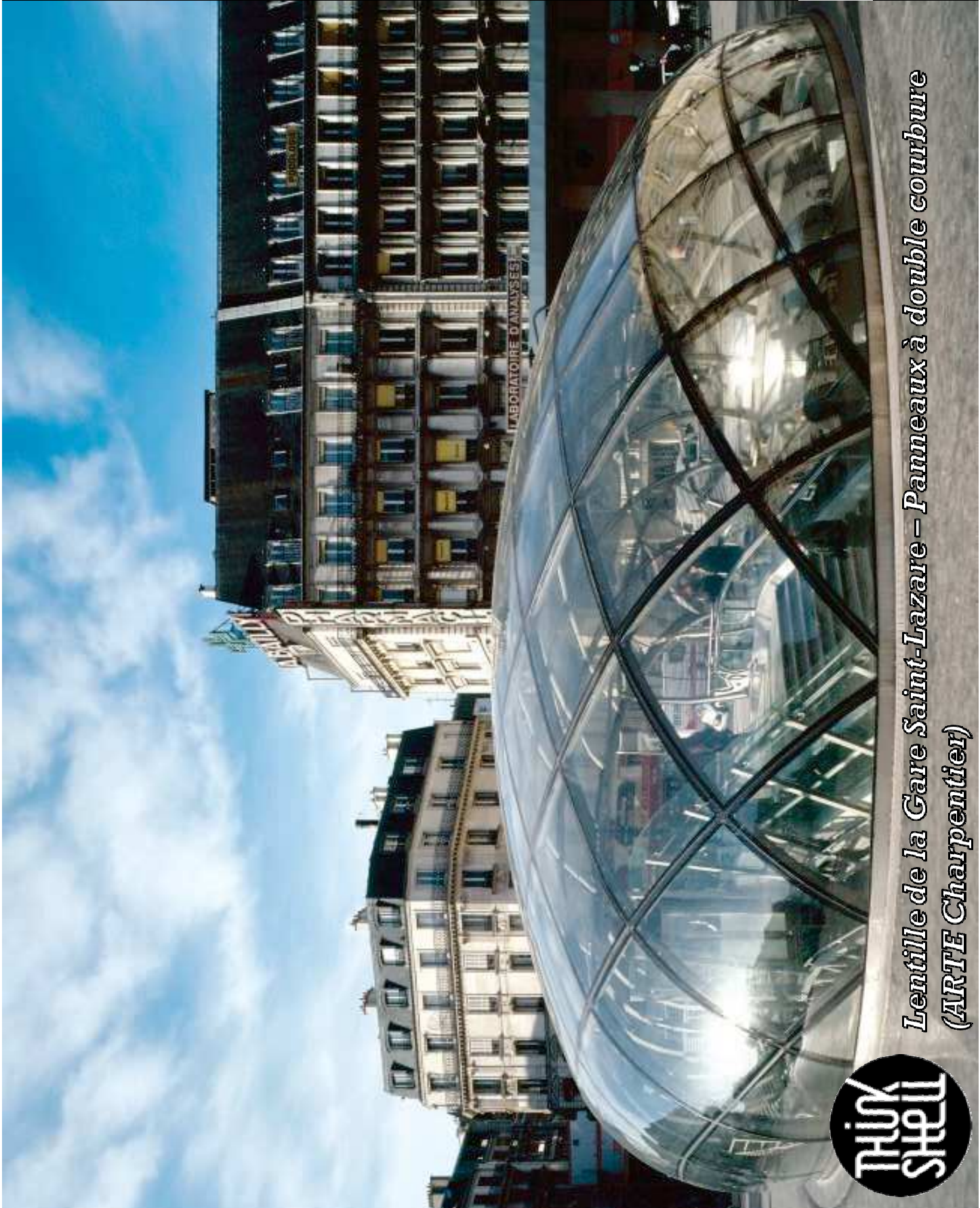


# Propriétés des panneaux

- Des **panneaux plans** sont souhaités en général
- Alternative: **bandes développables** (verre cintré à froid, métal)
- Dépend du matériau (non pertinent pour ETFE par ex.)



*Gare de Strasbourg – panneaux cintrés à froid (image: RFR)*



*Lentille de la Gare Saint-Lazare – Panneaux à double courbure  
(ARTE Charpentier)*





EN

*The Blob (Eindhoven) – Panneaux triangulaires  
Wagner-Biro*

**THINK  
SHELL**

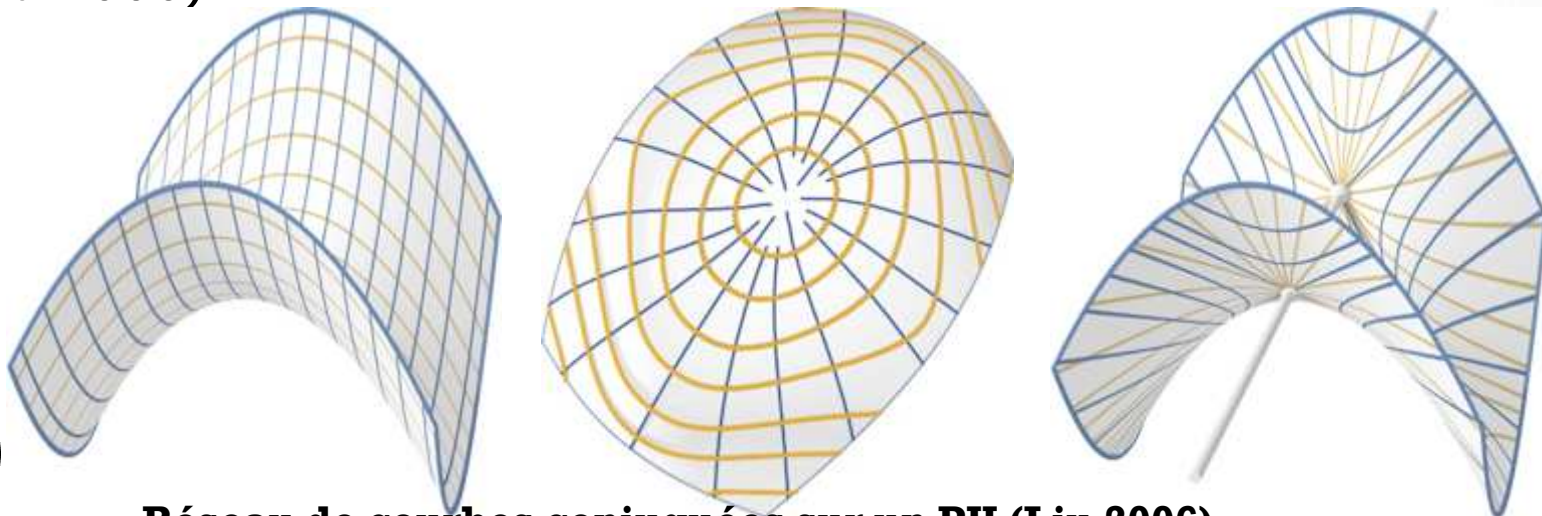


Terrasses dorées  
Image: Waagner-Biro



# Quelques résultats

- Un panneau triangulaire est toujours plan...
  - ...Mais les nœuds sont plus complexes!
- Il est possible d'introduire une énergie de planéité
  - Exemple: distance des points au plan moyen
  - Mais tout réseau ne converge pas vers un résultat!
- Notion de **réseau de courbes conjuguées** (Sauer 1970, Liu 2006)



Réseau de courbes conjuguées sur un PH (Liu 2006)



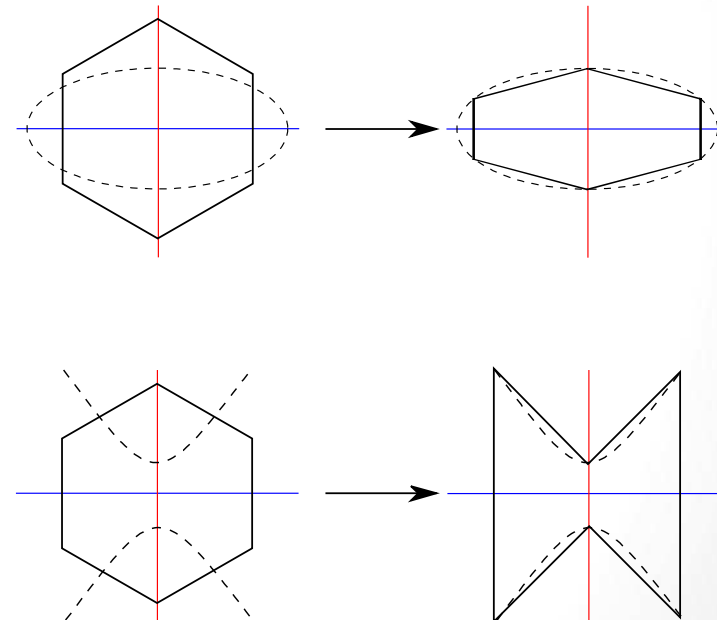


# Et pour le reste?

- On peut couvrir une surface avec des hexagones plans en suivant les **lignes de courbure**
- On ne sait pas grand chose sur les autres patterns...



Surface couverte par des hexagones plans



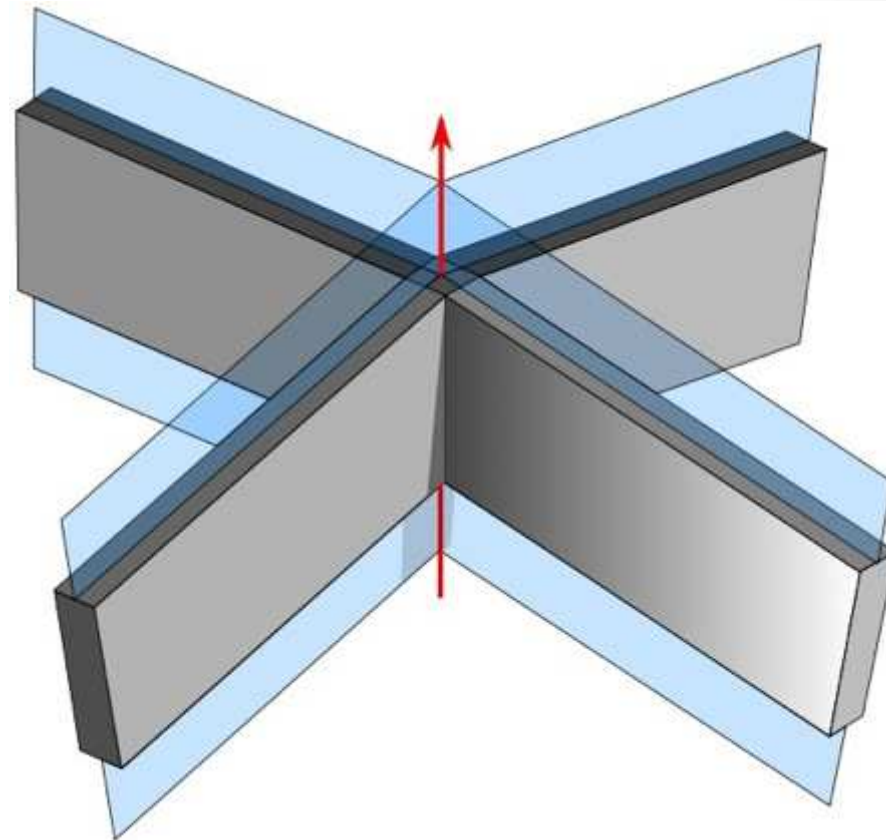
Hexagones plans s'alignant avec l'indicatrice de Dupin



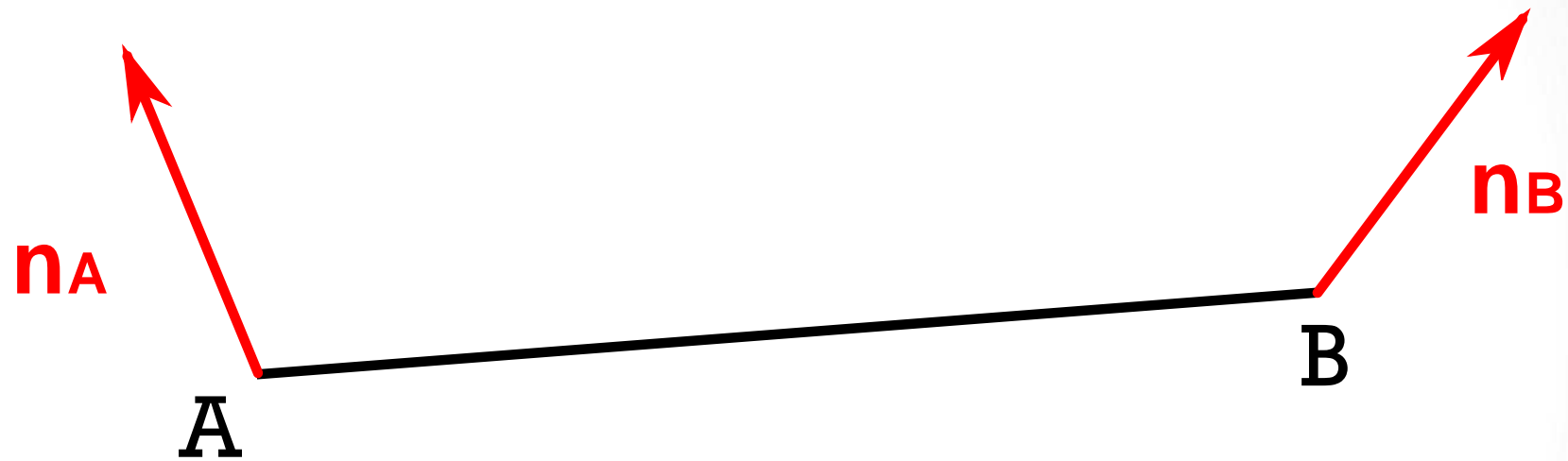
# Géométrie des noeuds :

## Torsion géométrique

- Intérêt de donner un axe à un nœud
- Deux axes (vecteurs) et une droite ne sont pas forcément coplanaires!
- Un nœud où les plans médians des poutres sont concourantes est dit **sans torsion**



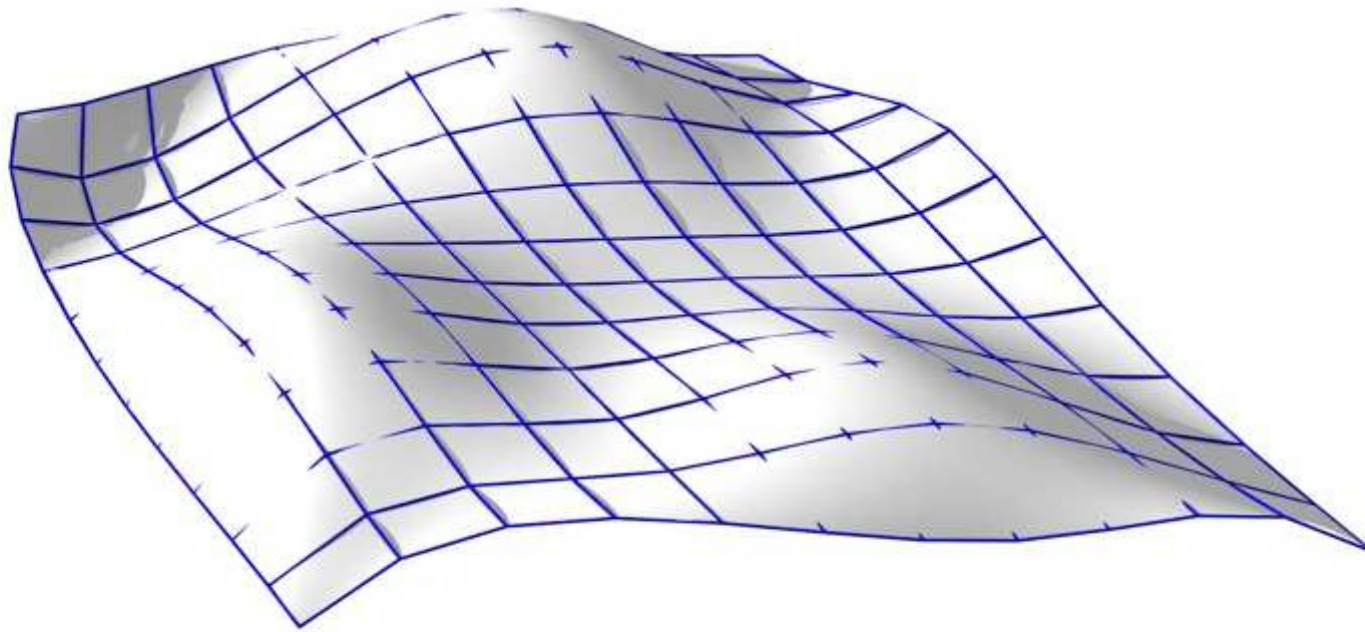
# Torsion géométrique



Poutre plane entre les deux axes :  $\det(AB, n_A, n_B) = 0$



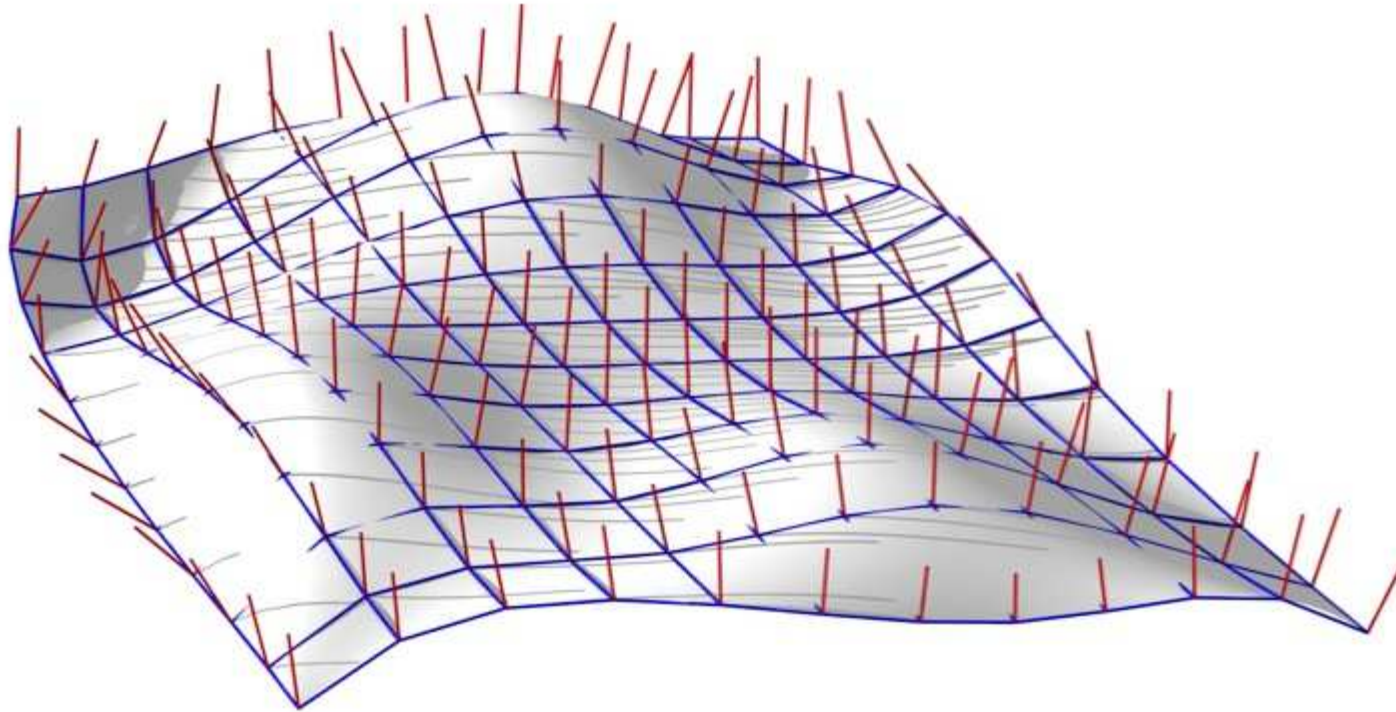
# Torsion géométrique



*Maillage quelconque sur une forme libre*



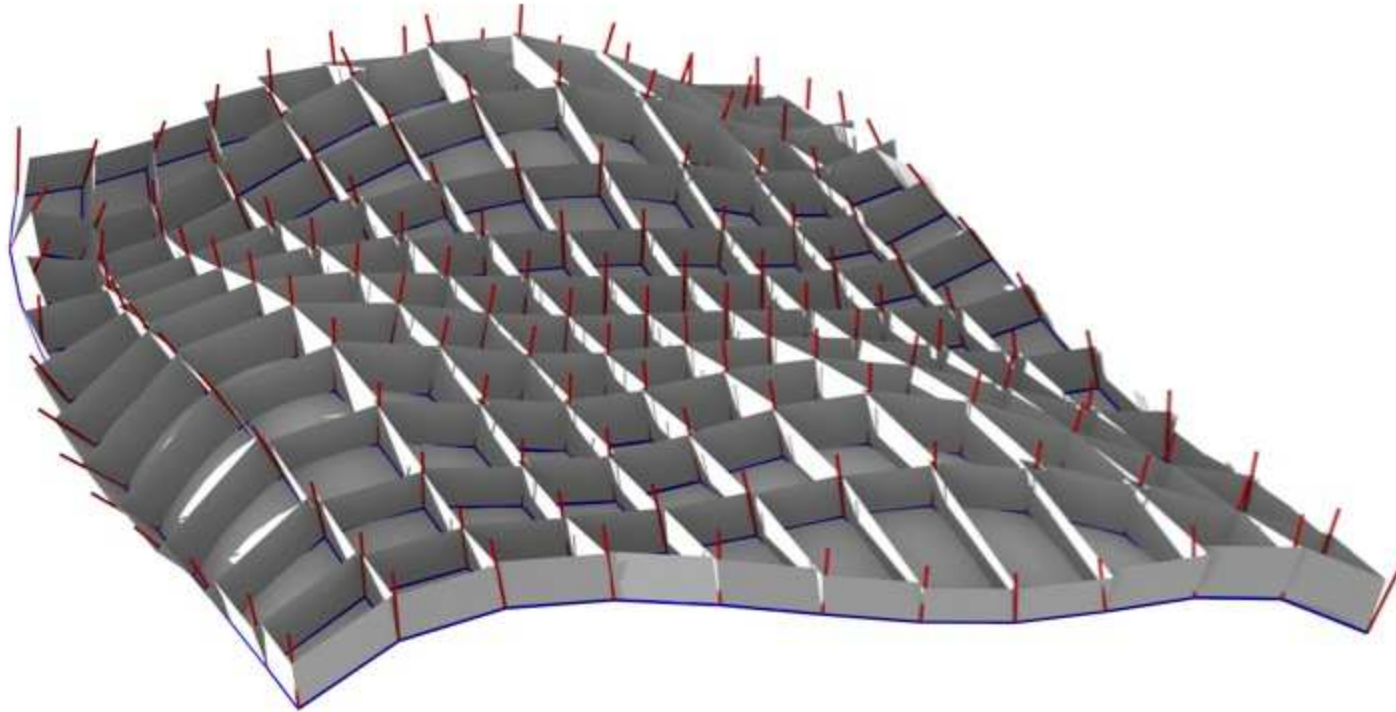
# Torsion géométrique



*Réseau de normales discrètes associé au maillage*



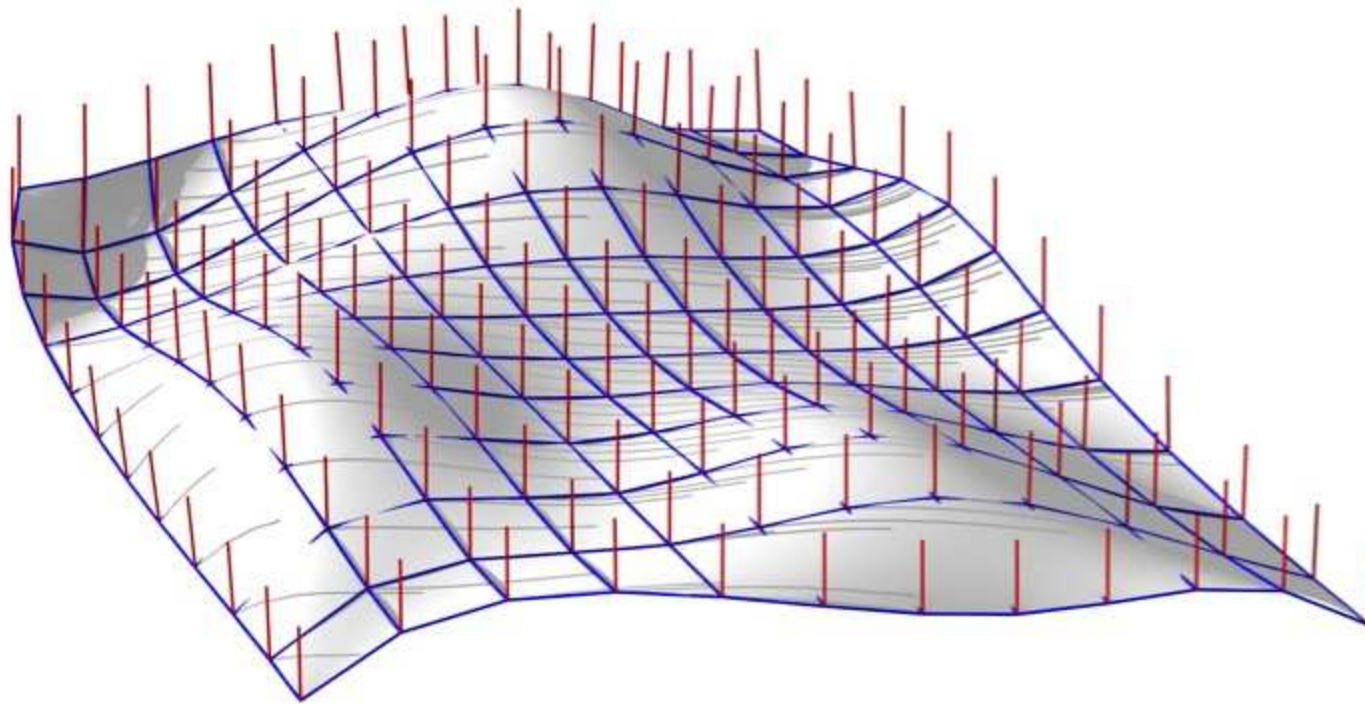
# Torsion géométrique



*Réseau de poutres avec torsion résultant*



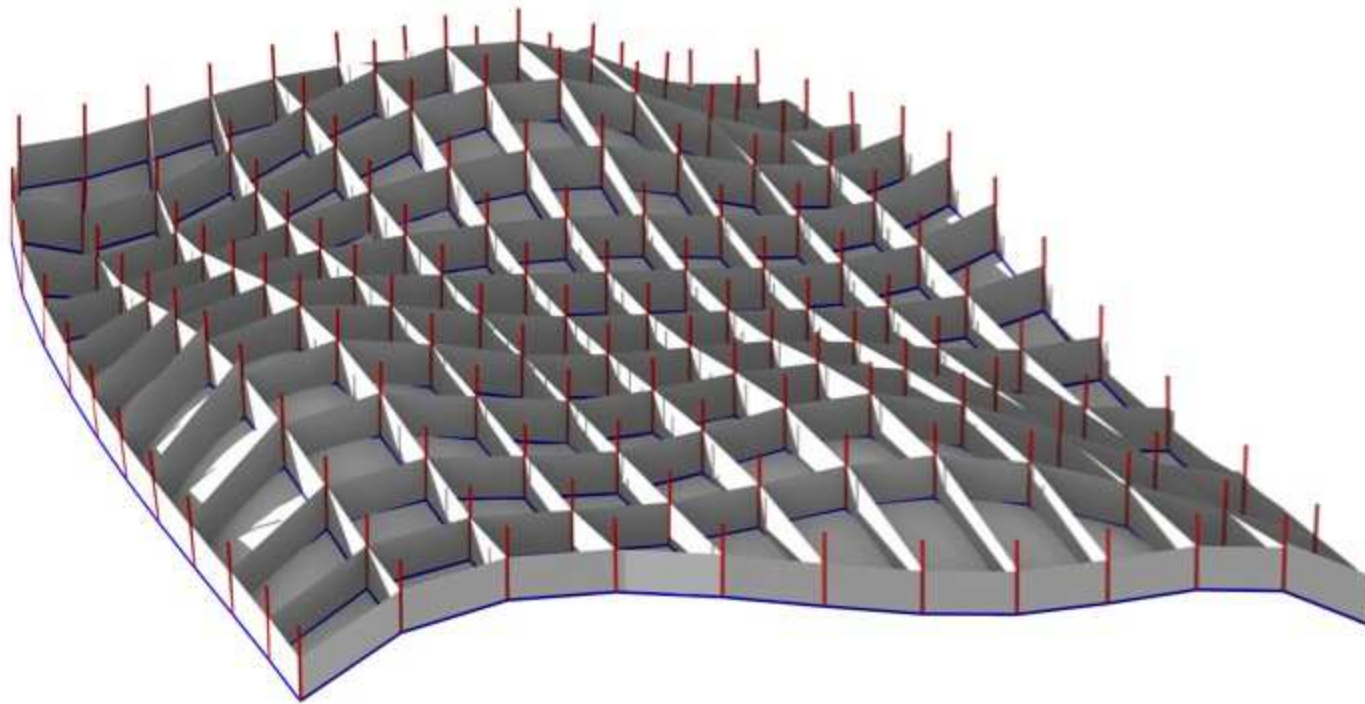
# Torsion géométrique



*Orientation de nœuds optimisée pour la torsion*



# Torsion géométrique

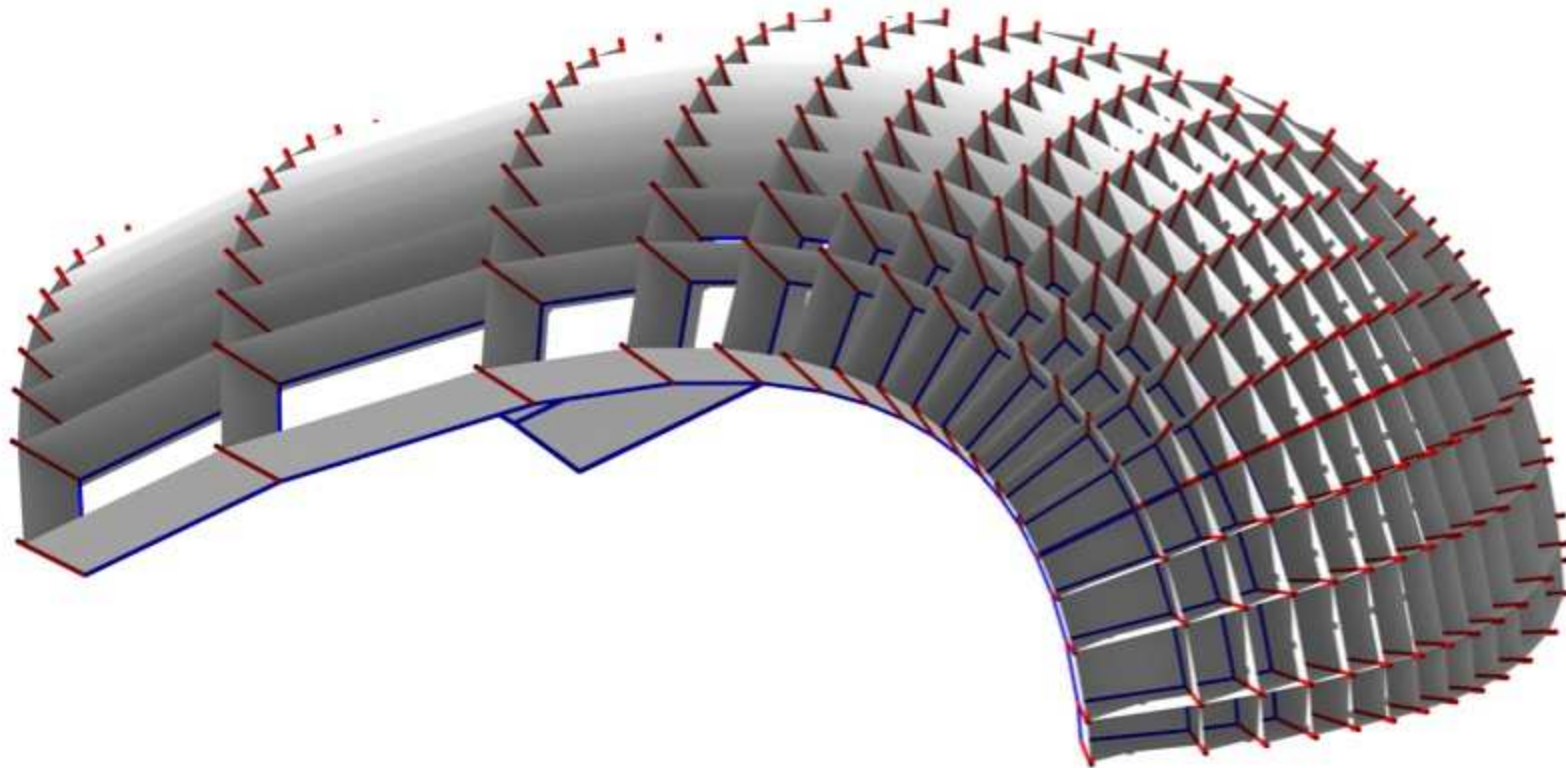


*Réseau de poutres optimisé pour la torsion*





# Torsion géométrique

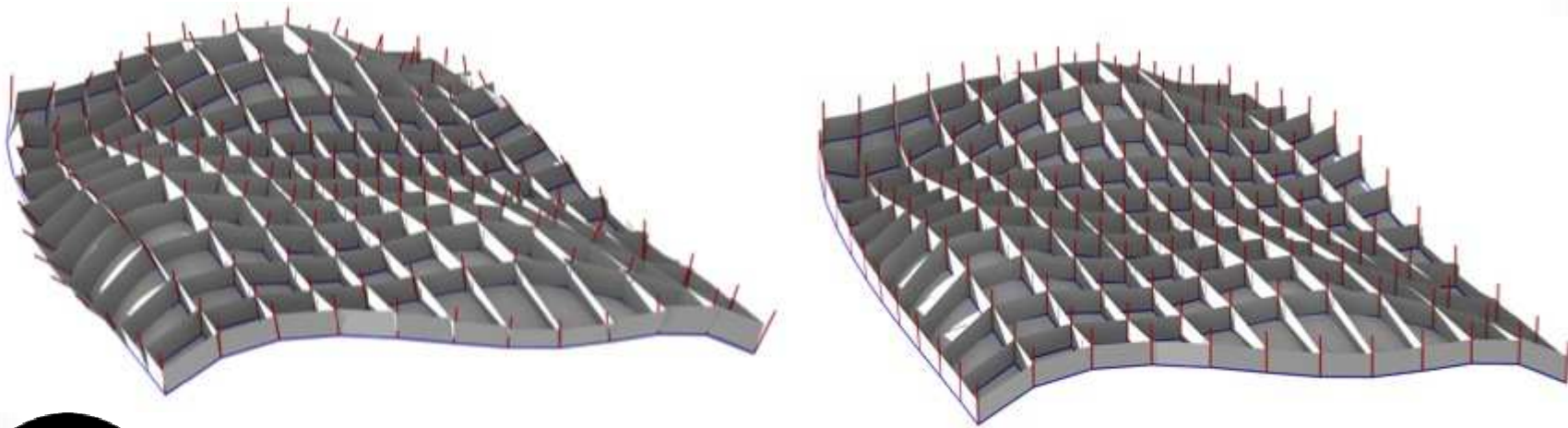


*Surface maillée par ses lignes de courbure et réseau sans torsion associé*



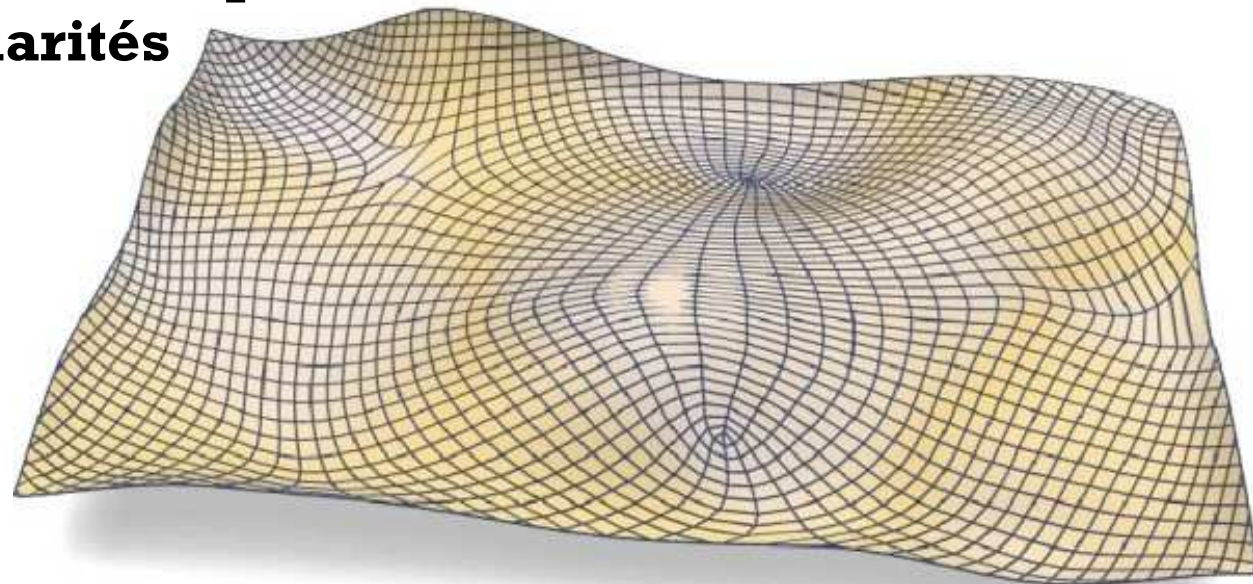
# Torsion géométrique

- Un axe à direction unique donne toujours des nœuds sans torsion (« offset trivial »)
- Peu de maillages sans offset non trivial (torsion-free)
- Un maillage triangulaire n'est **pas** torsion free



# Quelques résultats

- Les seuls réseaux de quadrangles aboutissant à des panneaux plans et des nœuds sans torsion sont issus des **lignes de courbure** (Liu 2006)
- Sur une forme quelconque, cette approche est peu flexible, car on n'a **pas de liberté sur la localisation des singularités**



*Couverture de la cour Visconti au Louvre et maillage dérivé des lignes de courbure (Image: Pottmann et al.)*

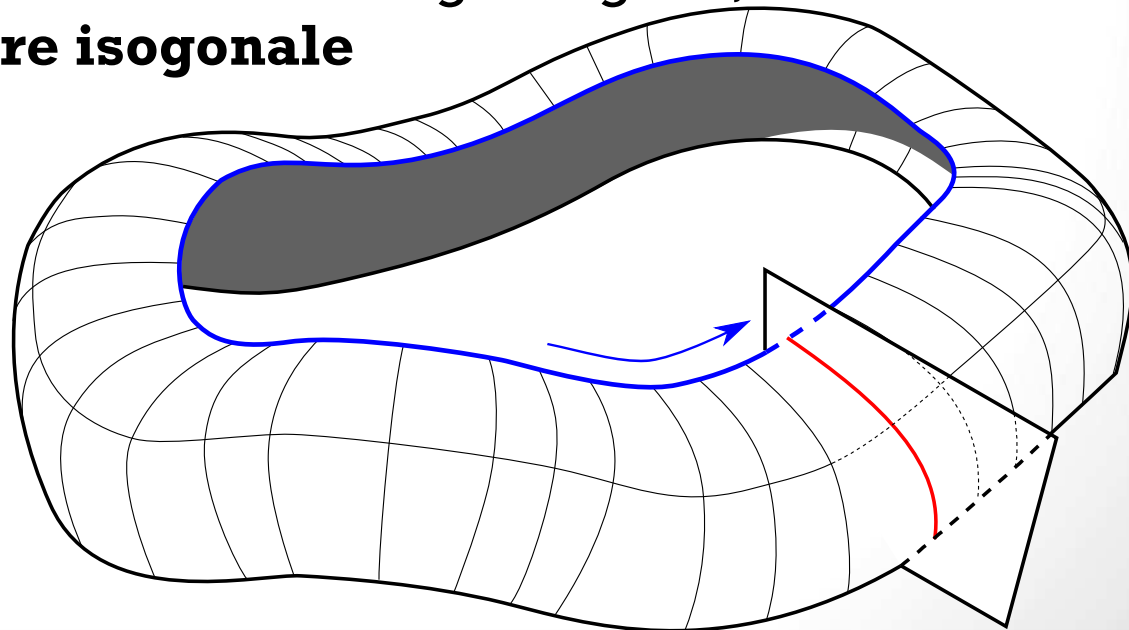
# Vers des approches plus flexibles?

- Plusieurs objectifs de rationalisation de forme opposés
- Pas de « recette » miracle ou de « super théorème »
- Les formes flexibles sont des moyens de **représentation formelle** mais ne sont plus des objets de compréhension
- Réflexion sur les technologies disponibles et futures pour les gridshells



# Surfaces de Monge

- Surface générée par **balayage** d'une courbe **plane** (**génératrice**) le long d'une autre courbe (**rail**)
- Si la **génératrice** est une droite, on a une **surface développable**
- Si le **rail** est plan, on a une **surface moulure**
- Si le **rail** est plan et divisé en angles égaux, on a une **surface moulure isogonale**



- Centre Pompidou Metz: analogie mécanique panier tressé
  - Perte du tissage
  - Pas d'active bending
  - Que reste-t-il de l'intention initiale?



# Technologies



# Technologies de nœuds

- Progrès constant depuis les années 1980 (Stefan)
- Grande influence de la raideur des nœuds sur la charge critique de flambement
- Les technologies les plus récentes réalisent des encastremements, même pour des grilles triangulées
- Développement de la fabrication automatisée





# Noeuds boulonnés

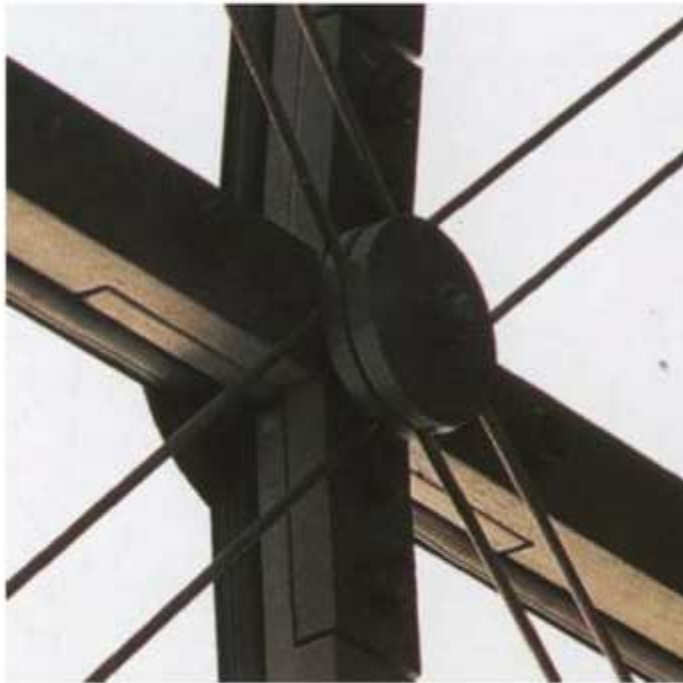
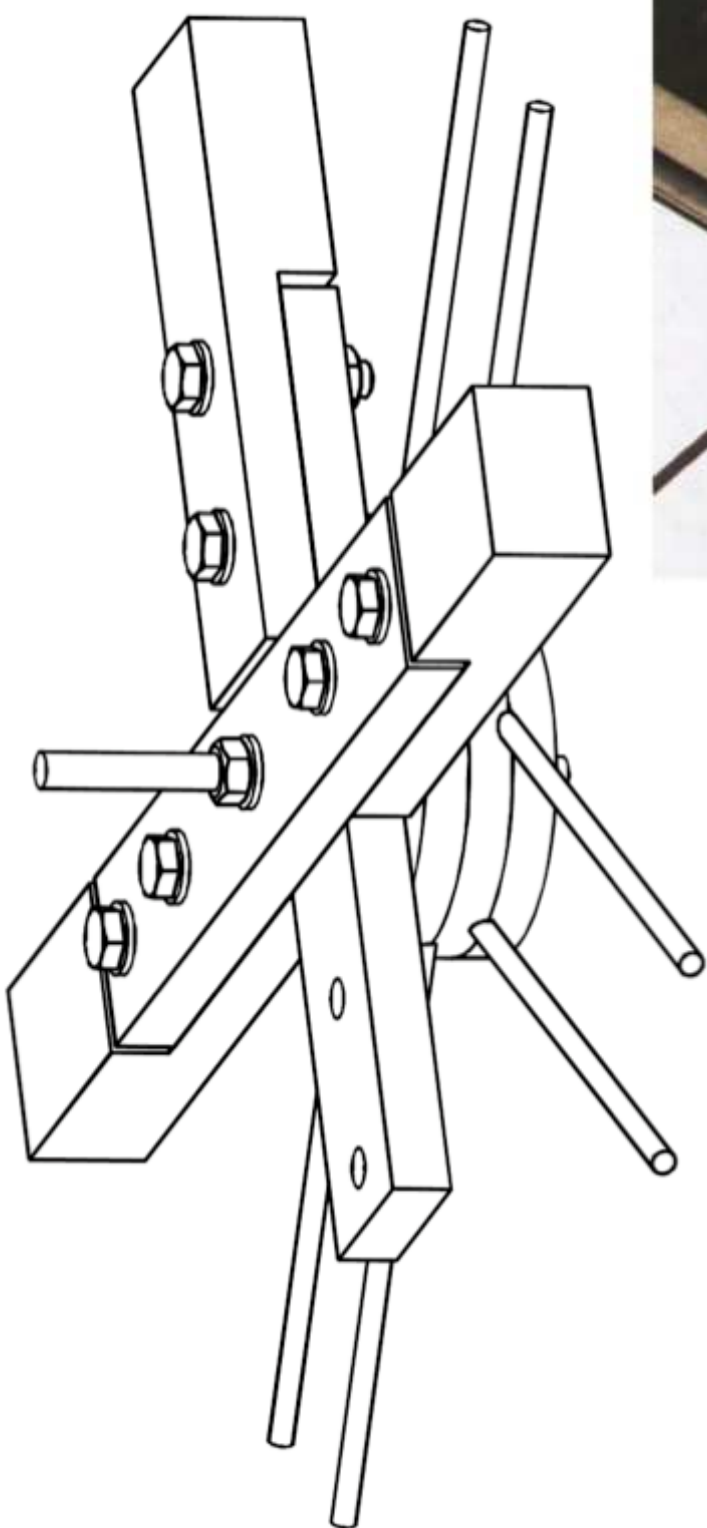
- Technologie historique inspirée de connexions Mero
- Multiples pièces (20-30 par noeud)
- Exemples: Gridshell de Westfield



*Dôme géodésique (Buckminster Fuller), Vitra Campus*

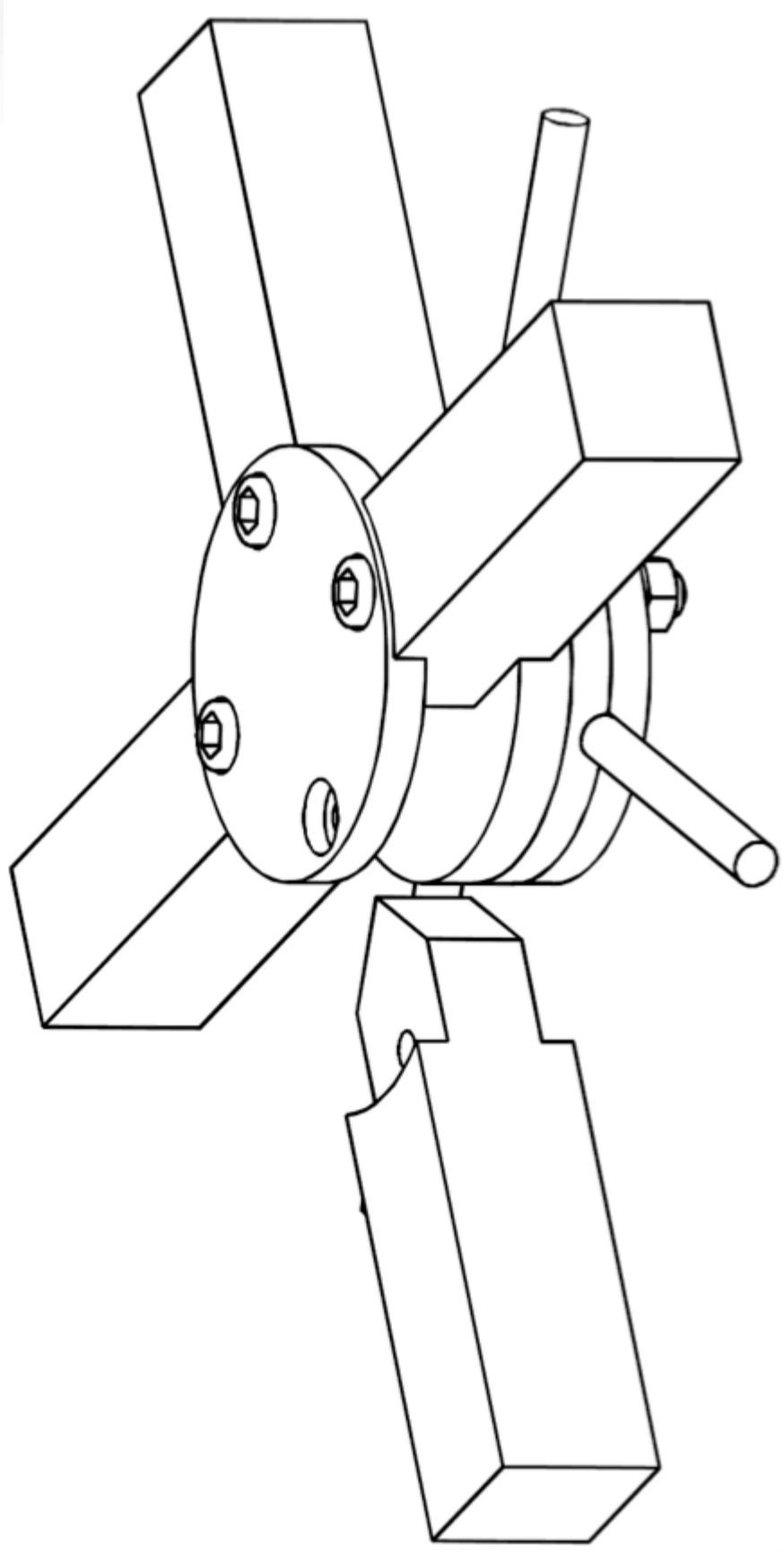
*Premiers noeuds boulonnés pour structures spatiales: les « bols »  
de Mero*





Noeud du musée de Hambourg





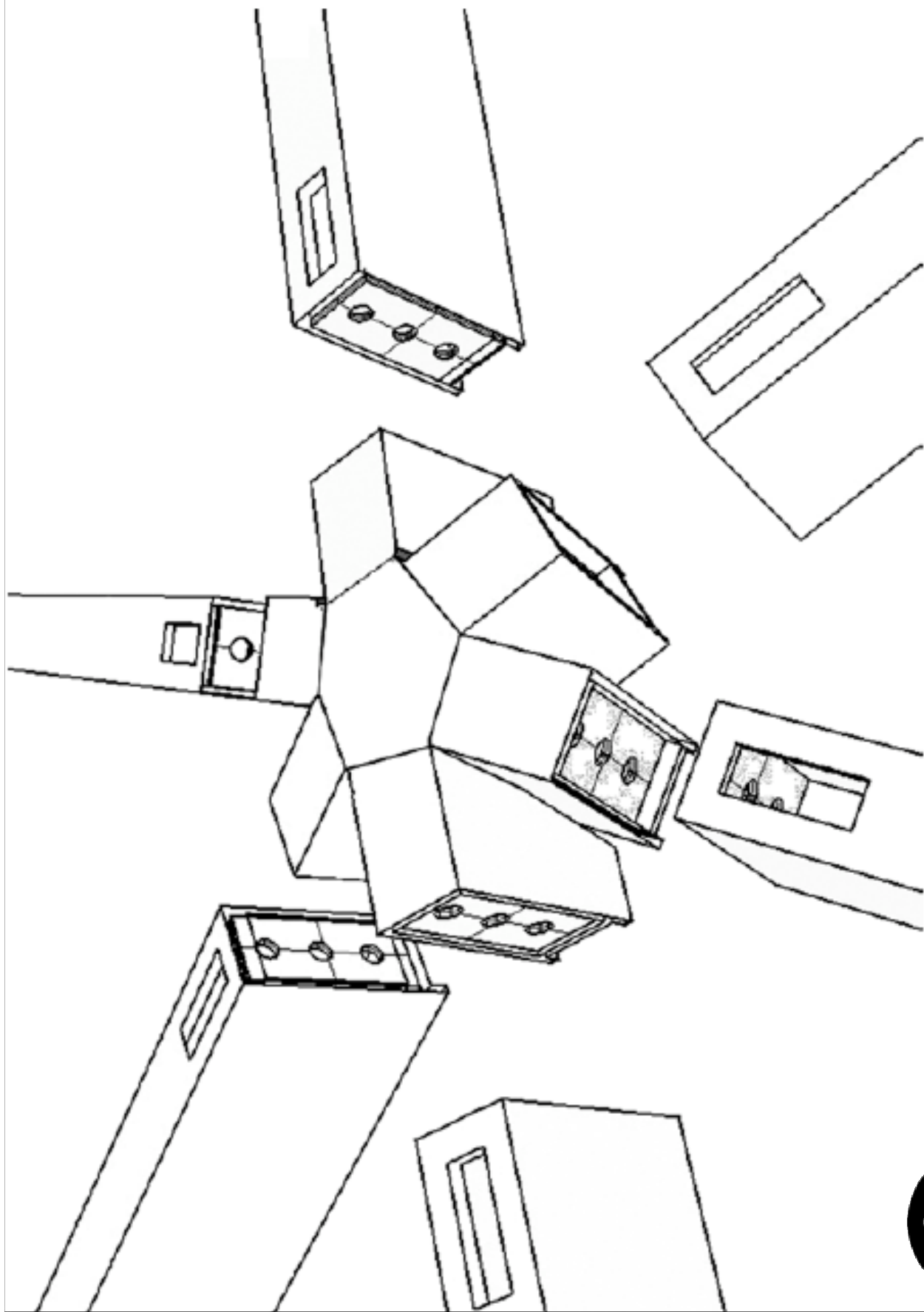
*Noeud de la maison des hippopotames*





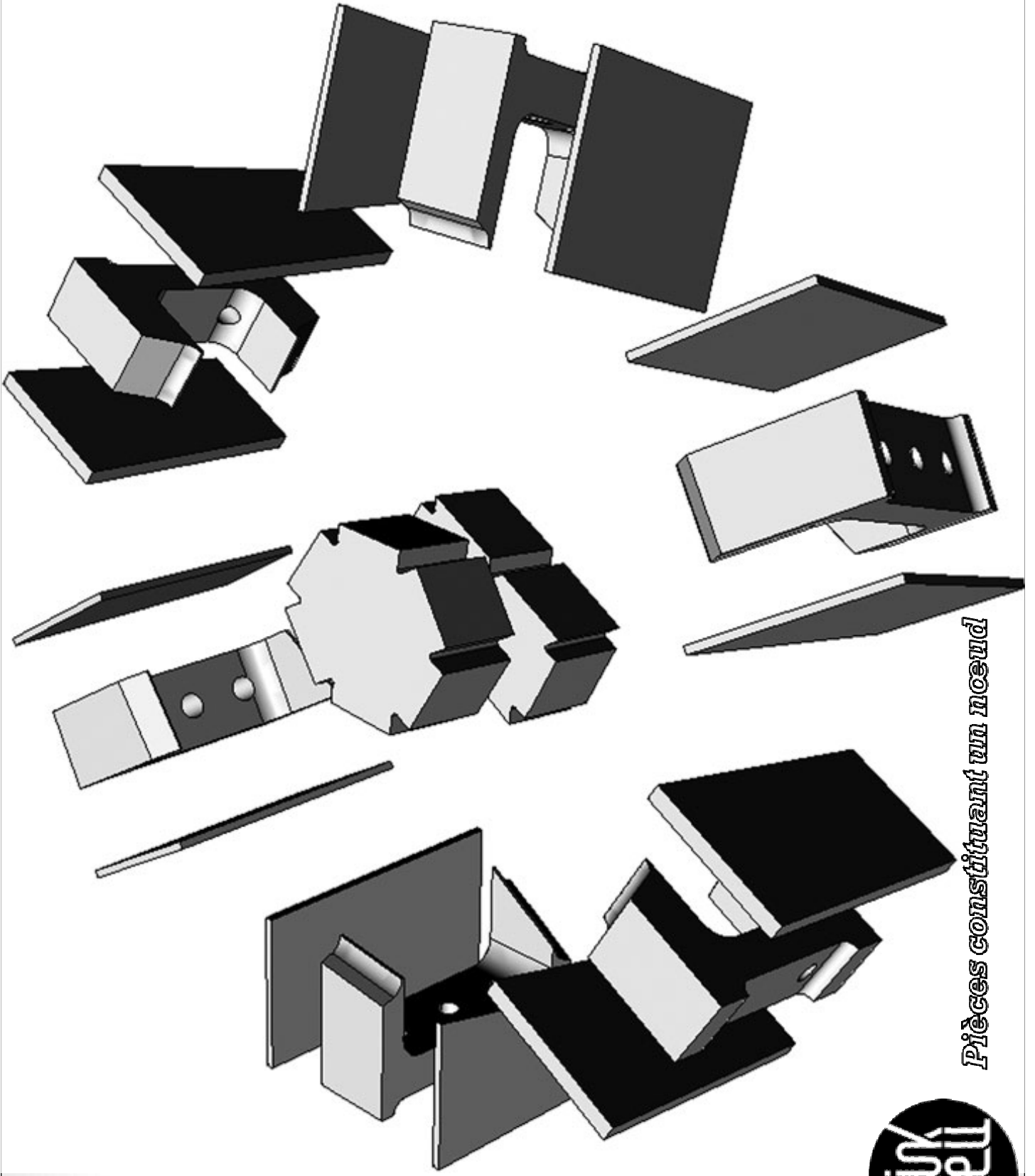
*Gridshell du centre commercial de Westfield*





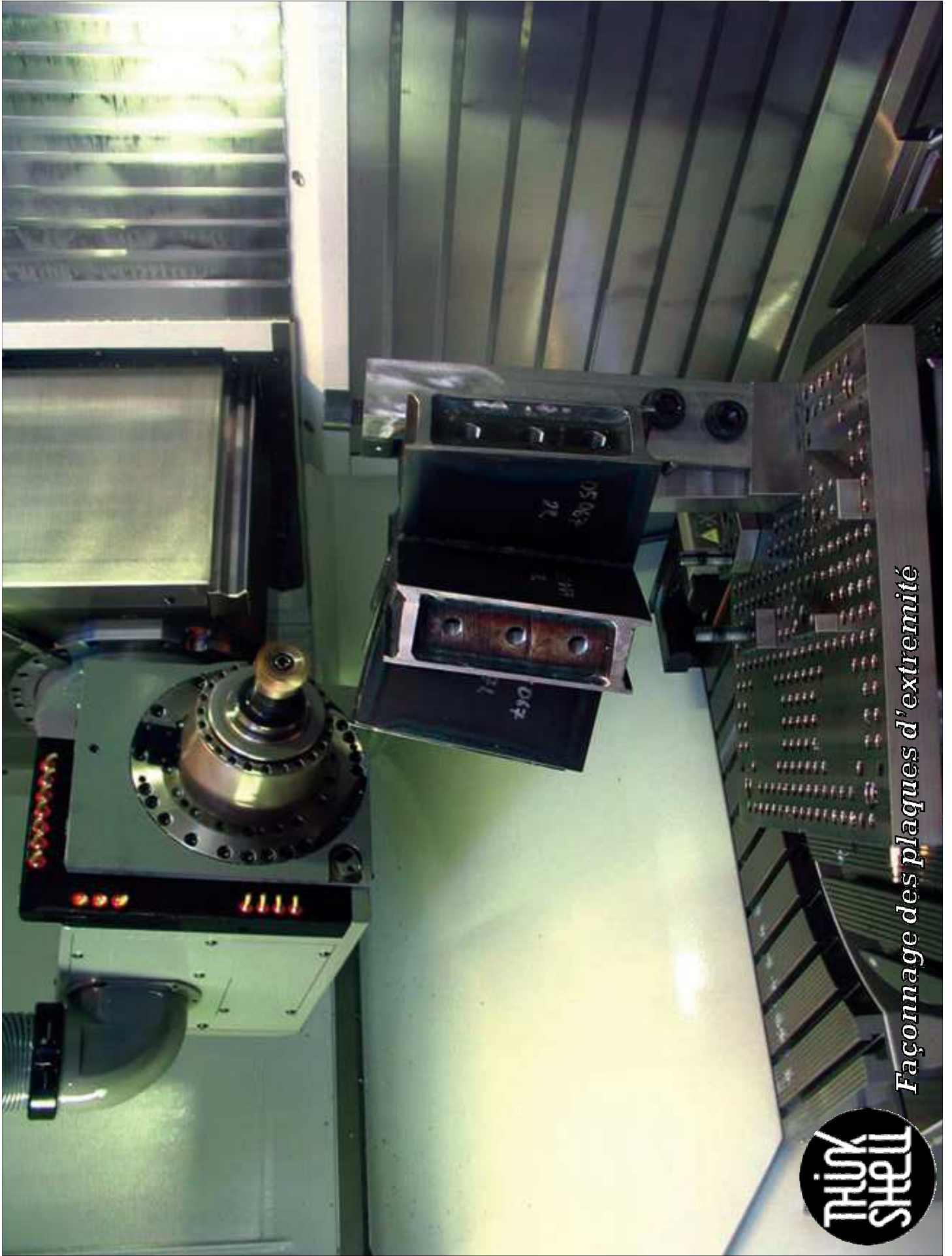
*Principe constructif des nœuds du gridshell de Westfield  
(Knippers/Helbig)*





*Pièces constituant un noeud*





*Façonnage des plaques d'extrémité*







Les poutres reconstituées, l'épaisseur des semelles et le nombre de  
boulons varie





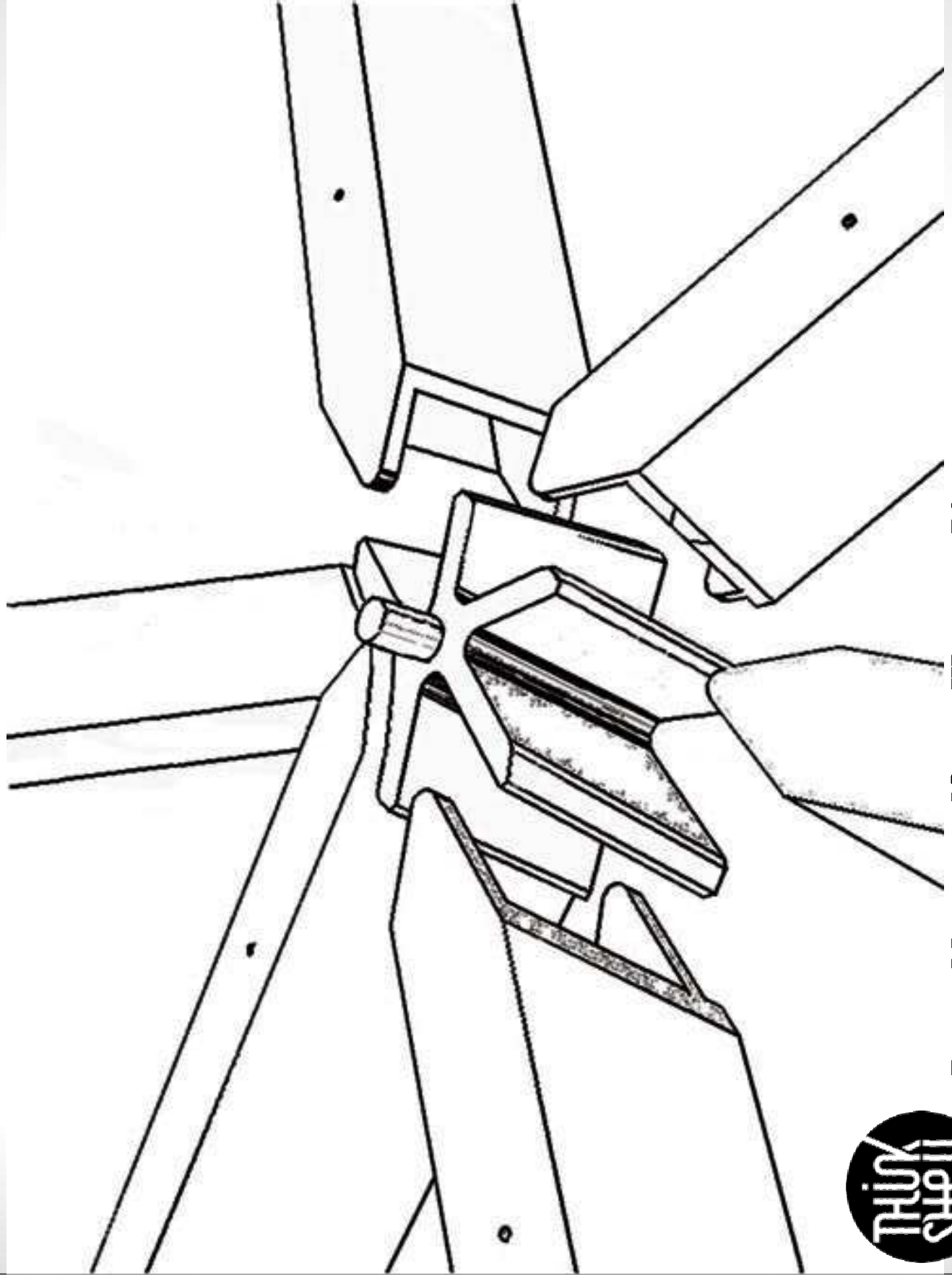
*Boulonnage et assemblage sur site*



# Nœuds soudés (Waagner Biro)

- Technologie plus récente
- Connexion en étoile, découpe plasma
- Hauteur structurelle limitée (15-20 cm)
- 100% de soudures sur site
- Exemples: British Museum, MyZeil





*Assemblage soudé type Waagner Biro*

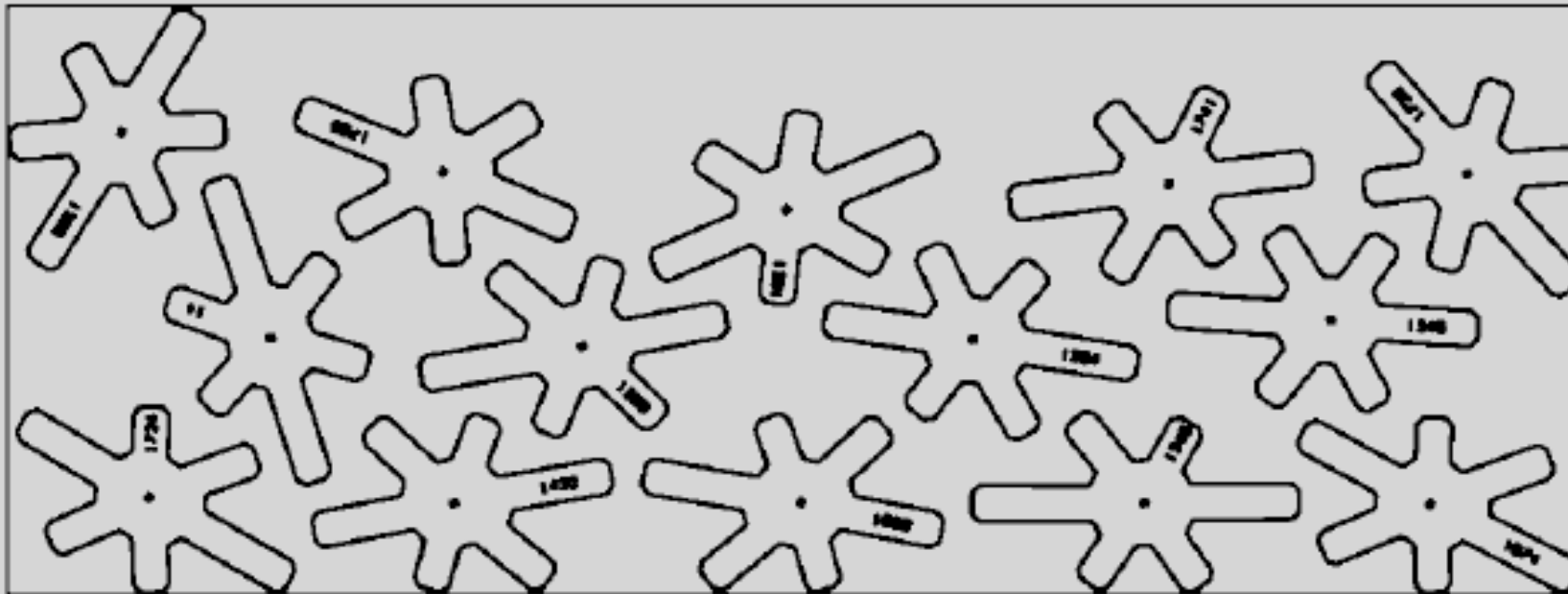




*Découpe d'acier (180mm) pour le British Museum avec  
commande numérique (image: Sischka)*

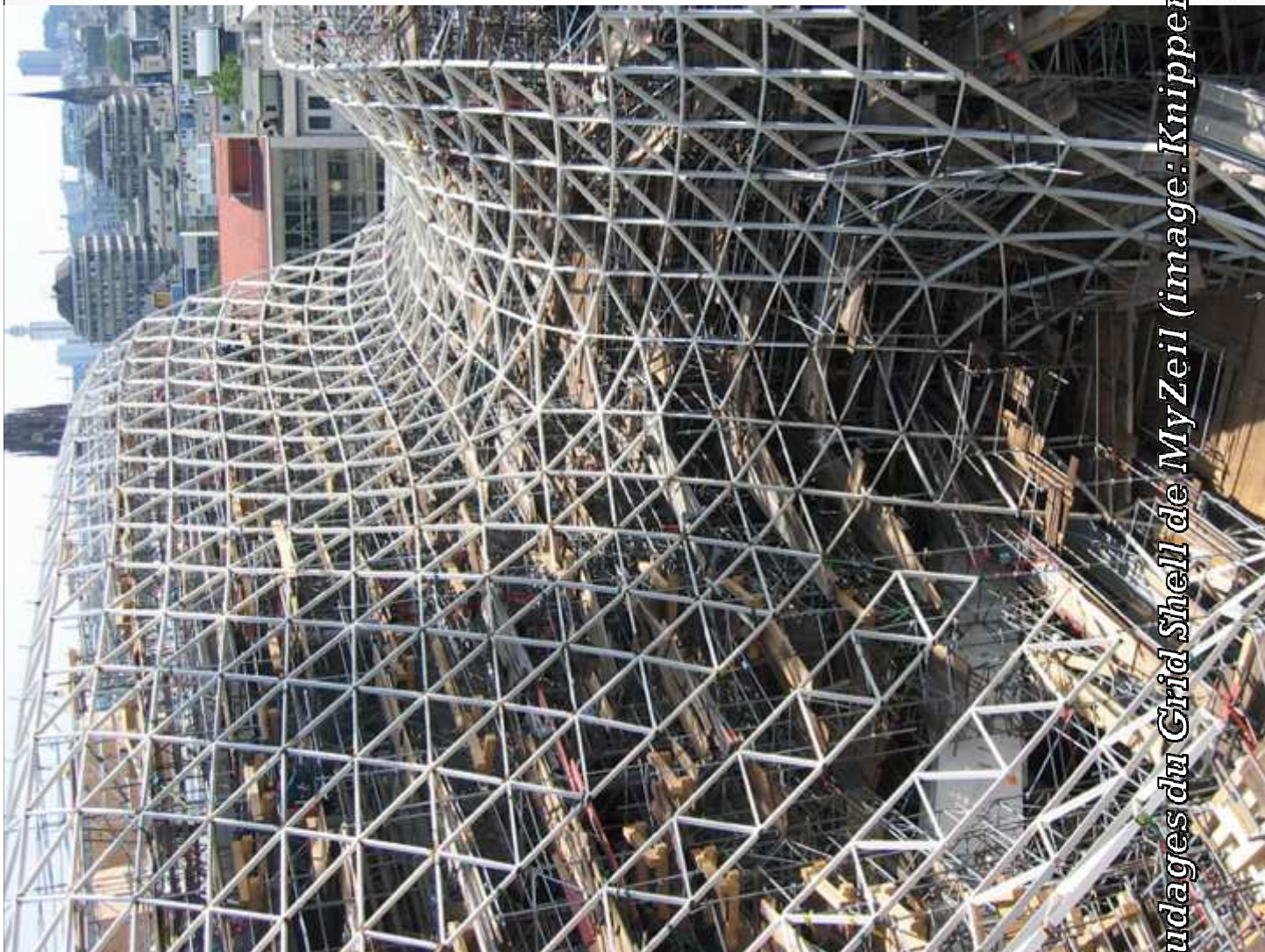


# Nesting: comment optimiser la découpe pour un gabarit imposé



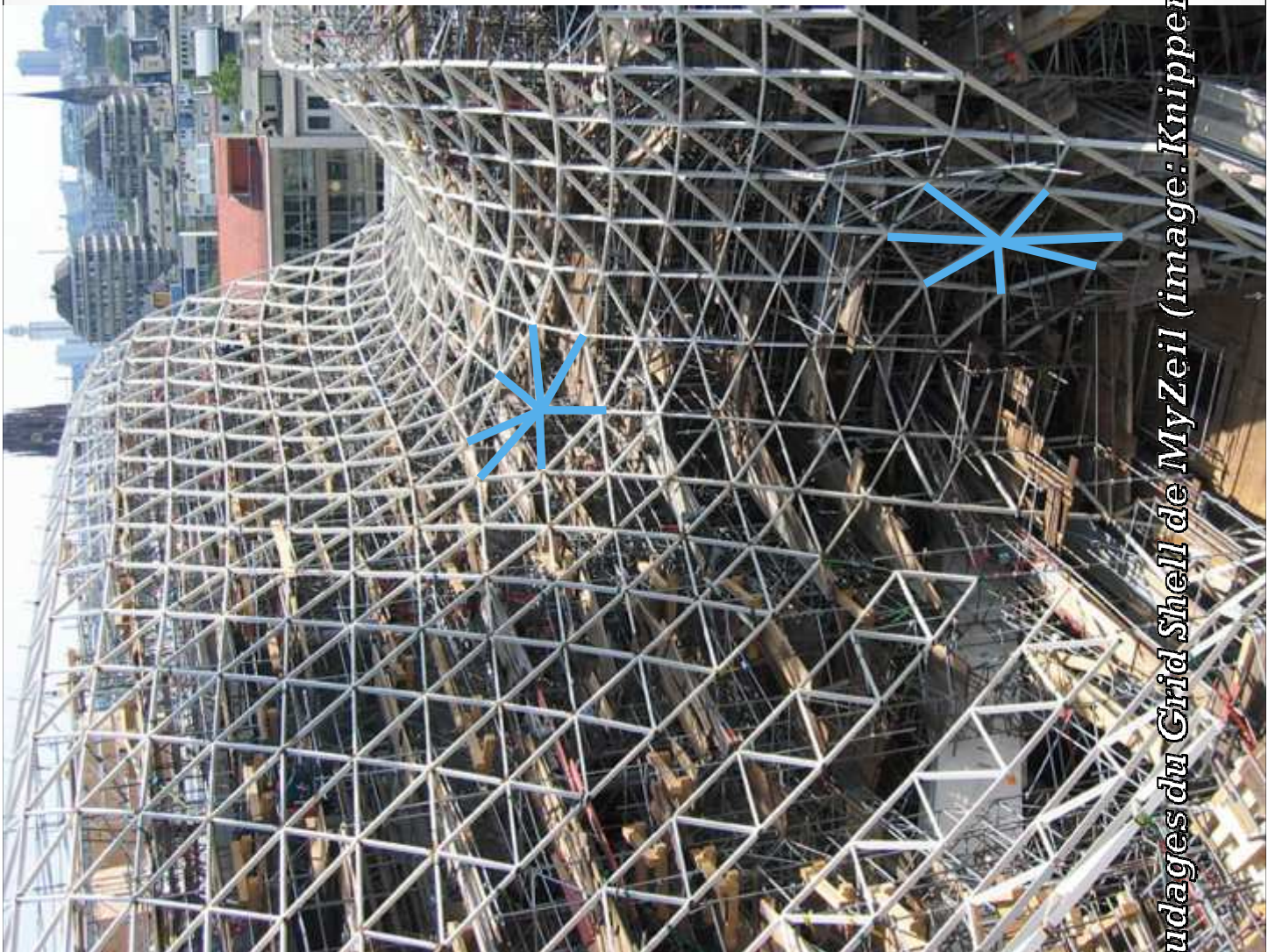
*Optimisation des découpes pour le British Museum (image: Sischka)*





*Échafaudages du Grid Shell de MyZeil (image: Knippers/Hellbig)*





*Écharfaudages du Grid Shell de MyZeil (image: Knippers/Hellbig)*





*Vue d'un noeud soudé et des pastilles de maintien du verre*





*Bord d'un panneau triangulaire et joint en silicone*



# 5. Prototype de gridshell ENPC 2014

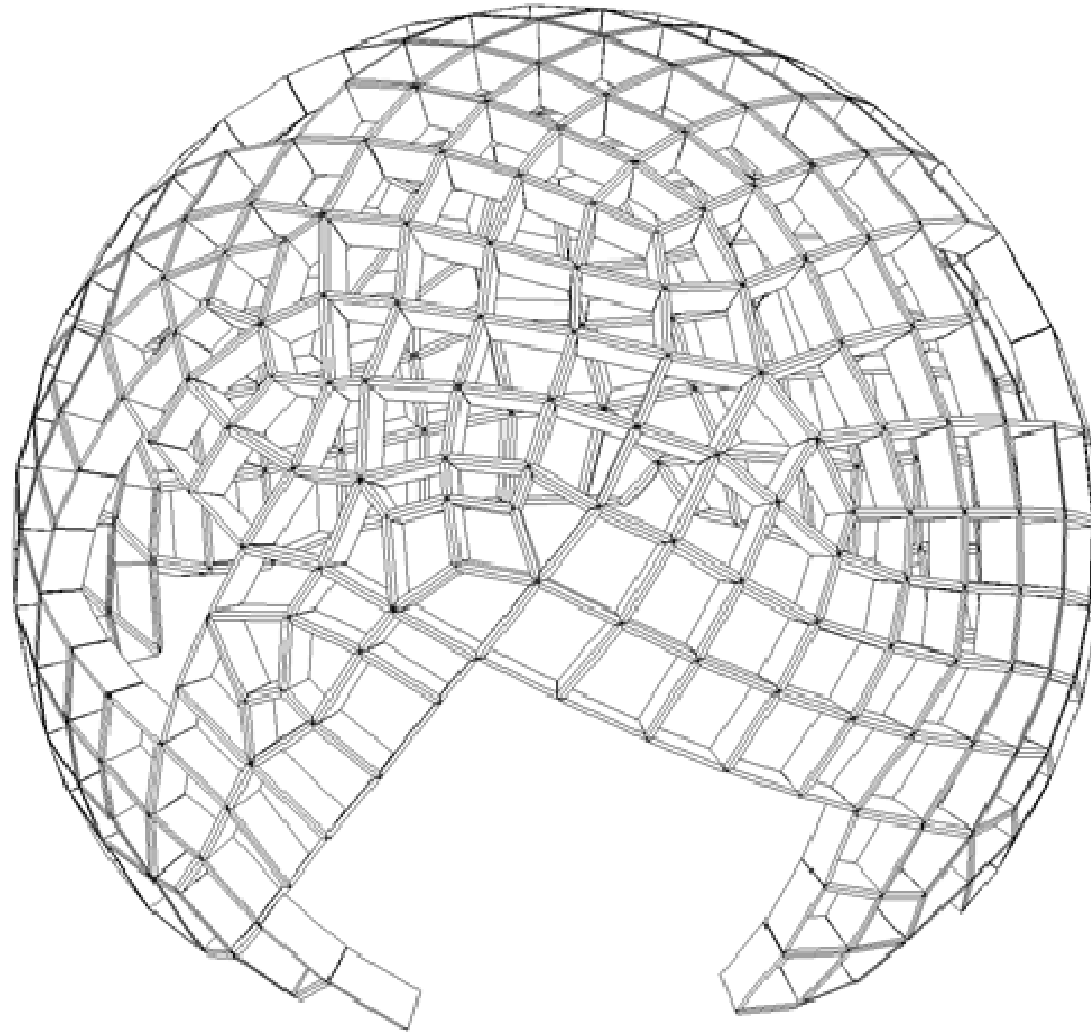


# Objet grid shell

- Problématiques similaires à celle des gridshells: torsion des poutres ou nœuds, panneaux plans
- Construction par voussoirs pour éviter la construction de nœuds



# Précédent: Swiss Bau Pavilion (2005)



*Modèle numérique (image: ETH Zürich)*





*Construction par blocs*





*Fixation entre deux blocs*

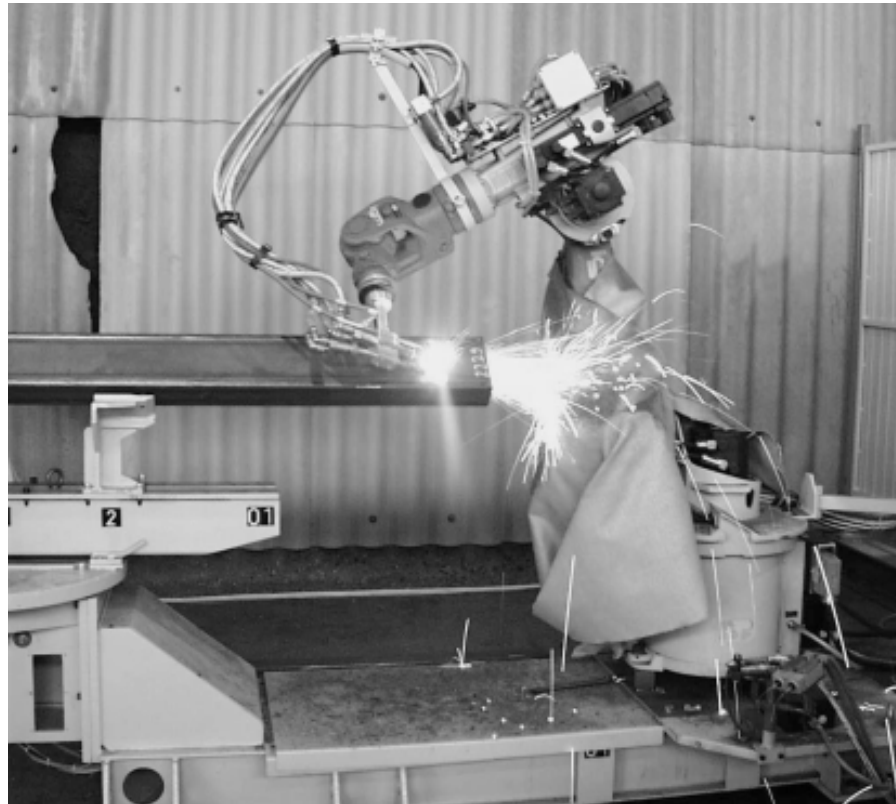
*Pattes en alu pour la stabilité interne*



*Détail constructif*



# Découpe d'éléments complexes



*Eux...*

*Et vous?*





# Références

- ***Die Überdachung des Great Court im British Museum in London***, Sischka et al., Stahlbau, Vol.70 (2001)
- ***Recent Developments in the design of Glazed Grid Shells***, Knipper J. and Helbig T., International of Space Structures, Vol.24 (2009)
- ***Stability of Grid Shells***, Bulenda Th. And Knippers J.



- ***Contribution à conception et réalisation des morphologies non standard: les formes pascaliennes comme outil***, Bagneris M., PhD Thesis (2009)
- ***Geometricon et Topologicon***, Jean-Pierre Petit



# Adresses internet

- ***Evolution of German Shells: Efficiency in Form,***  
Cours à Princeton,  
<http://shells.princeton.edu/index.html>



# Construire avec des matériaux innovants: exemple de l'ETFE



Stade du Havre (2012)