

Franchir mon pont !

Ateliers Design 2015
Cyril Douthe
Corinne Rouby



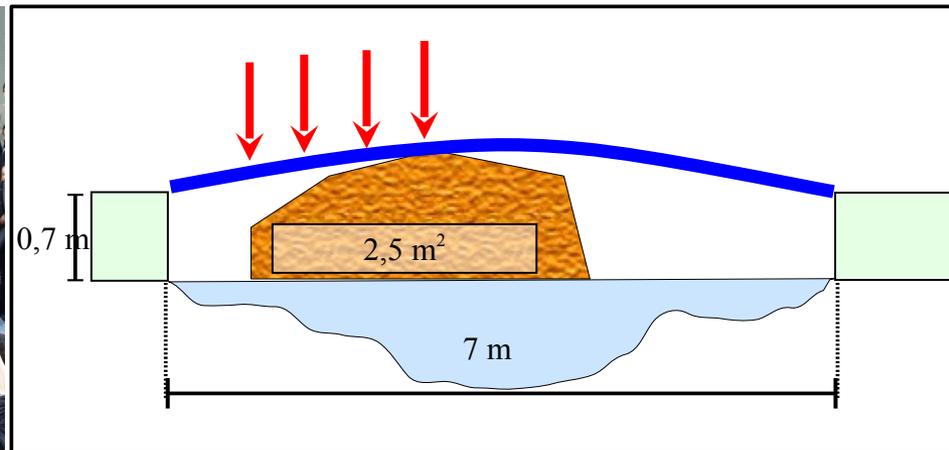
Franchir mon pont !

Quoi?

- Franchissement de 7 m avec une portée de ~ 4 m imposée;
- Une structure pas une sculpture;
- Appui sur des tables de part et d'autre de l'ouvrage;

Comment?

- Démarche de type projet;
- Approche expérimentale;
- Construction vissée et collée en bois.



Un objet en contexte



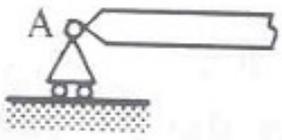
S. Calatrava, 2009, Venise

Nécessité d'une description schématique

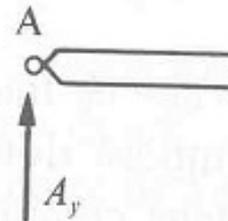
- Un critère fondamental, indispensable : la sécurité.
- Une réalité complexe
 - => nécessité de simplifications pour:
 - le calcul des structures,
 - l'évaluation et la comparaison des solutions.
- Un premier outil: le schéma statique
 - *Comment l'ouvrage s'appuie-t-il sur ses fondations?*
 - *Quelles sont les liaisons entre éléments?*
 - *Quel est son degré de complexité, de redondance?*

Les trois grands types d'appui

L'appui simple:



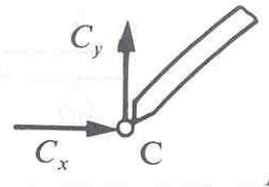
(1 réaction d'appui)



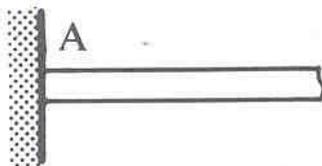
L'articulation ou rotule:



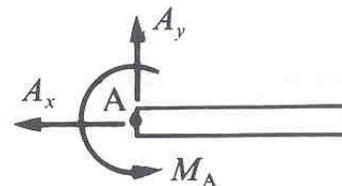
(2 réactions d'appui)



L'encastrement:



(3 réactions d'appui)



$$u = v = \theta = 0$$

Les liaisons

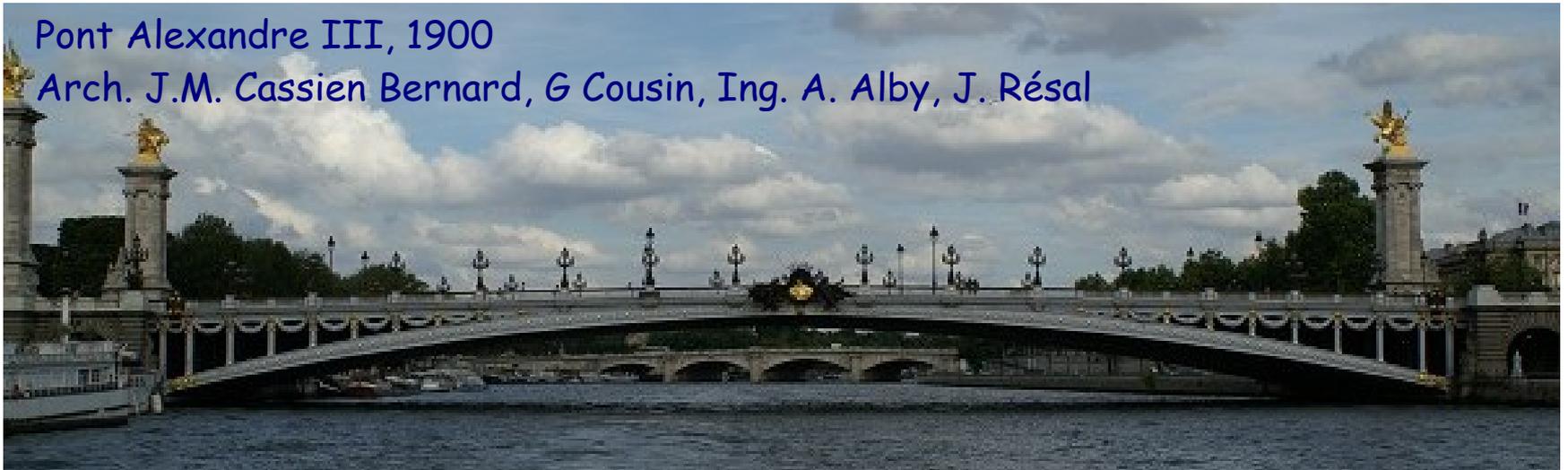
- Appui = relation entre la structure et l'extérieur;
- Liaison = relation interne à la structure entre ses différents constituants.
- Correspondance:
 - appui \Leftrightarrow organe de liaison
 - blocage \Leftrightarrow liaison
 - réaction d'appui \Leftrightarrow force de liaison
- Deux grands types : l'articulation et l'encastrement

Le schéma statique

Description simple des relations entre les éléments d'une structure et entre ceux-ci et l'extérieur.

Pont Alexandre III, 1900

Arch. J.M. Cassien Bernard, G Cousin, Ing. A. Alby, J. Résal

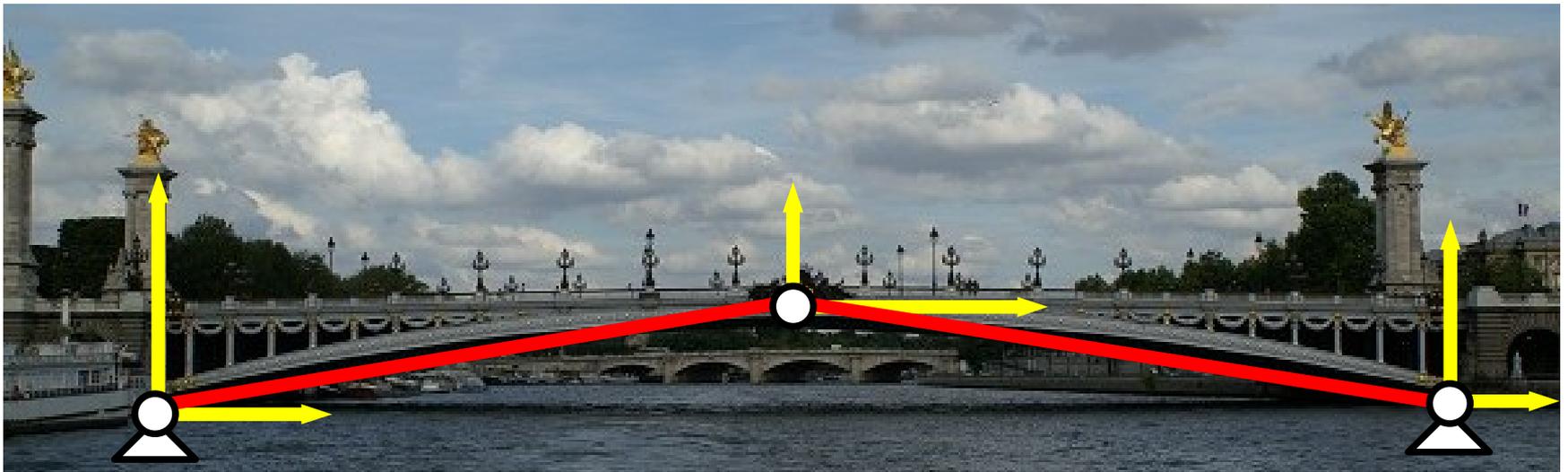


Utilisation du schéma statique:

- Mise en évidence des efforts inconnus.
- Détermination de la stabilité d'ensemble.

Le schéma statique

Description simple des relations entre les éléments d'une structure et entre ceux-ci et l'extérieur.



Utilisation du schéma statique:

- Mise en évidence des efforts inconnus.
- Détermination de la stabilité d'ensemble.

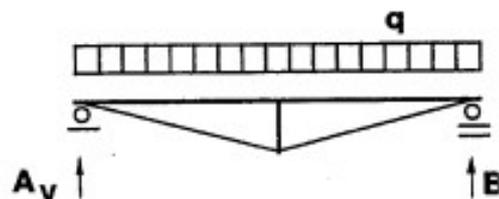
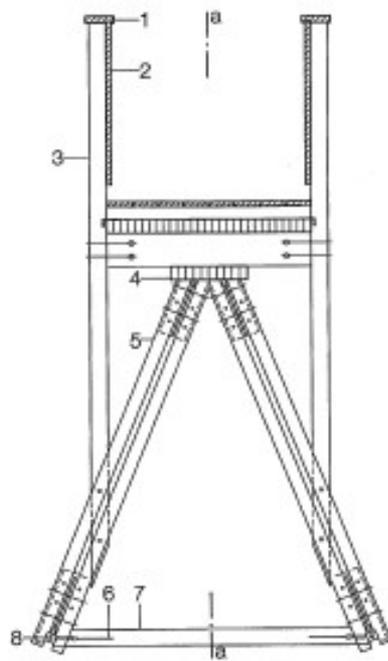
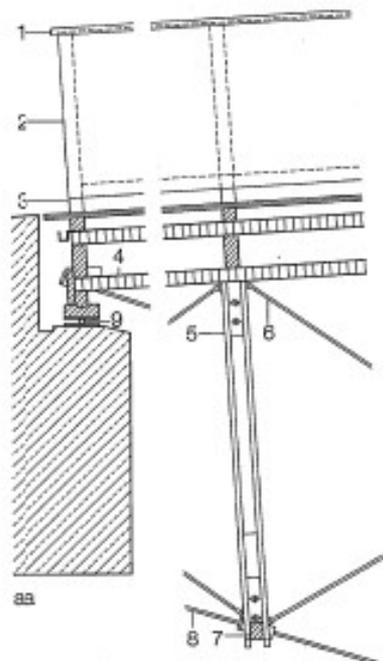
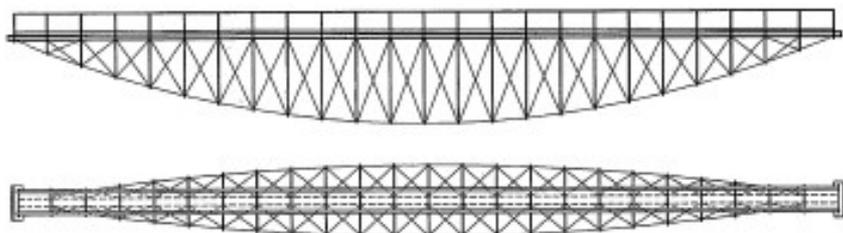
27 - Passerelle Traversina

Viamala (CH), 1996

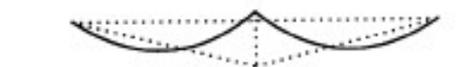
Ingénieurs structures:
Branger, Conzett & Partner, Coire (CH)

La situation particulière de ce pont impose: une construction aussi légère que possible. Elle devait en effet être transportée sur le site par hélicoptère et donc ne pas peser en tout plus de 4,3 t. Le pont se compose de deux éléments qui pouvaient être transportés séparément: la structure

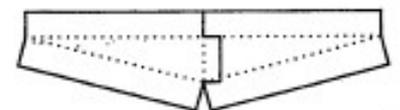
parabolique triangulée en bois, sur laquelle tous les éléments sollicités en traction sont des câbles en acier ou des éléments en acier rond, et les deux poutres maîtresses en panneaux trois plis destinés à empêcher les mouvements de torsion du pont. Ces deux éléments ont été reliés avec les jambages de balustrade qui se prolongent en H. Une poutre de rigidité en lamellé-collé a été placée au-dessus de la membrure en compression. Le pont a été détruit en 1999 par la chute de rochers.



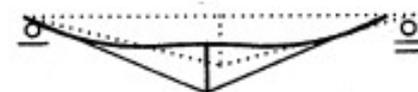
charges:
charges uniformément réparties
verticales



moments



efforts normaux



déformation

Équilibre des structures

- Une structure est en équilibre si son mouvement est nul, si on peut trouver un ensemble de valeurs pour les efforts inconnus qui équilibrent les actions extérieures.
- Les efforts extérieurs sont connus.
- Les efforts inconnus sont les efforts de liaisons et les réactions d'appuis.
- Il y a 3 équations d'équilibre par solide

$$\sum F_x=0 , \sum F_y=0 \text{ et } \sum M=0$$

Isostaticité et hyperstaticité

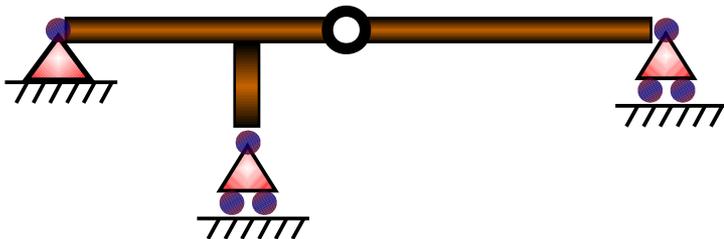
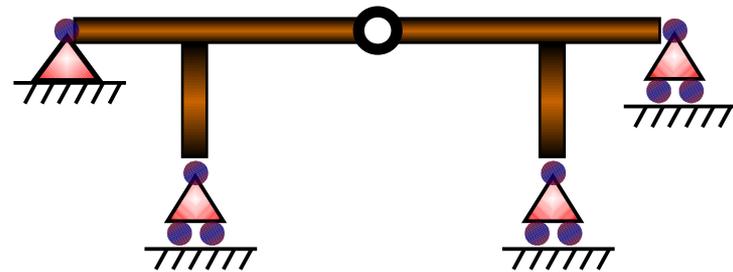
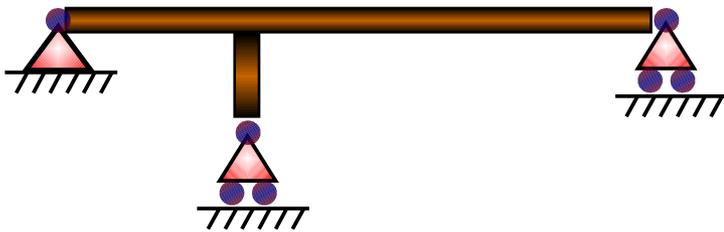
- Soit e , le nombre total d'équations d'équilibre
- Soit l , le nombre total d'inconnues de liaisons
- Soit r , le nombre total de réactions d'appuis
- Si $l+r = e$, la structure est **isostatique**: toutes les inconnues **peuvent** être déterminées à l'aide des équations d'équilibre statique.
- Si $l+r > e$, la structure est **hyperstatique**: toutes les inconnues **ne peuvent pas** être déterminées à l'aide des équations d'équilibre statique.
- Si $l+r < e$, la structure est un **mécanisme**: les conditions d'appuis et de liaisons sont incomplètes.

Isostaticité et hyperstaticité

- **Degré d'hyperstaticité:** nombre de réactions d'appuis et d'efforts internes surabondants.
- **Hyperstaticité externe:**
Réaction(s) d'appuis surabondante(s).
- **Hyperstaticité interne:**
Effort(s) interne(s) surabondant(s).

Exemples de schémas statiques

- Parmi les structures suivantes, lesquelles sont isostatique dans leurs appuis, isostatique globalement?



Évaluer les efforts

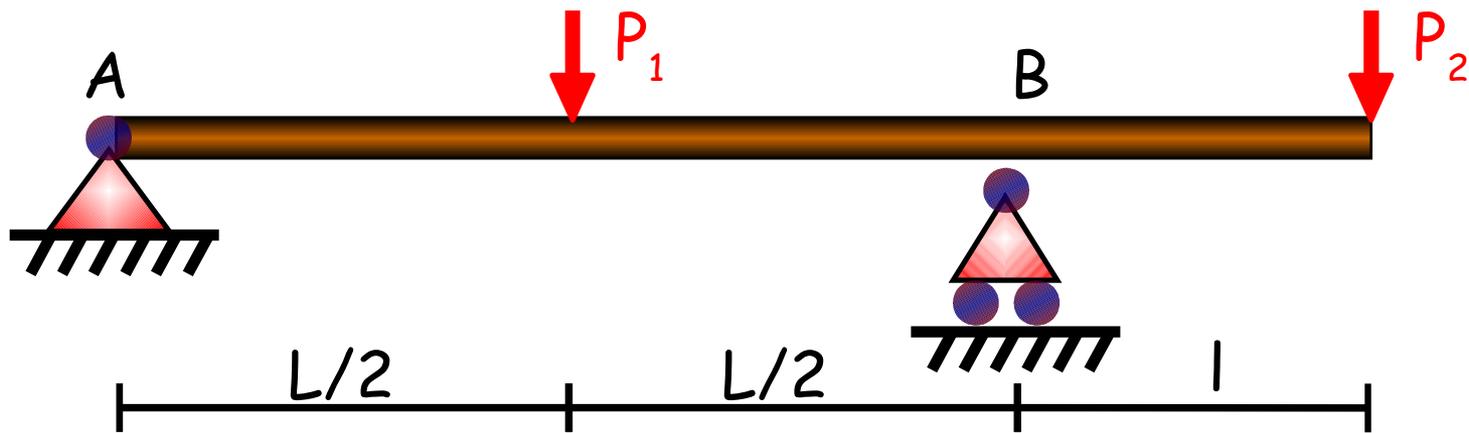
- Identifier les chargements
(Poids propre & charge mobile)
- Évaluer les réactions d'appuis.
- Évaluer les efforts intérieurs.
- Analyser les structures hyperstatiques.



Philippe Petit,
1974

Calculer les réactions d'appui

- Seulement pour les structures isostatiques et hyperstatiques intérieurement.
- Méthode de calcul: écriture des équations d'équilibre.

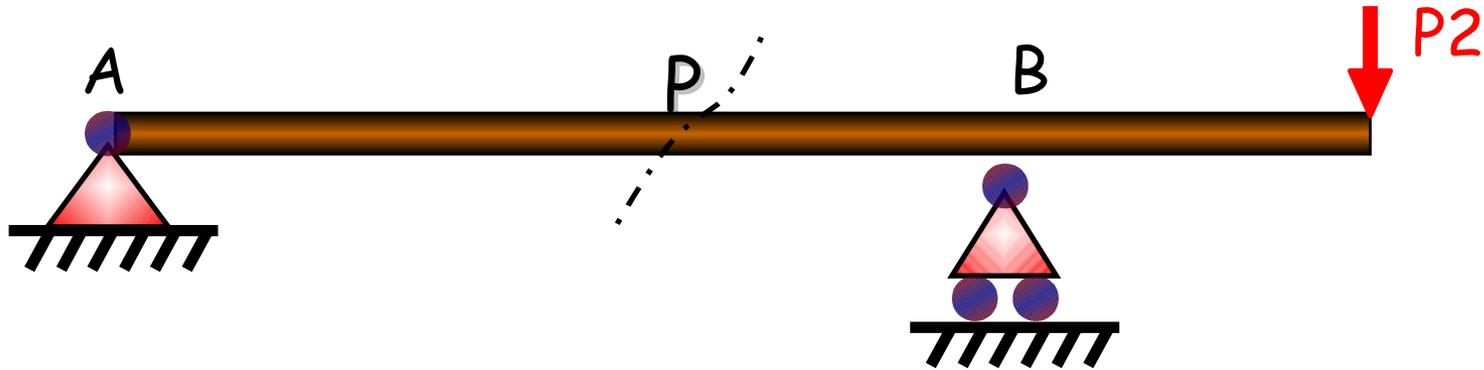


...Principe de superposition

Définition des efforts intérieurs

Au niveau de la coupe:

3 déplacements bloqués \Leftrightarrow 3 efforts inconnus

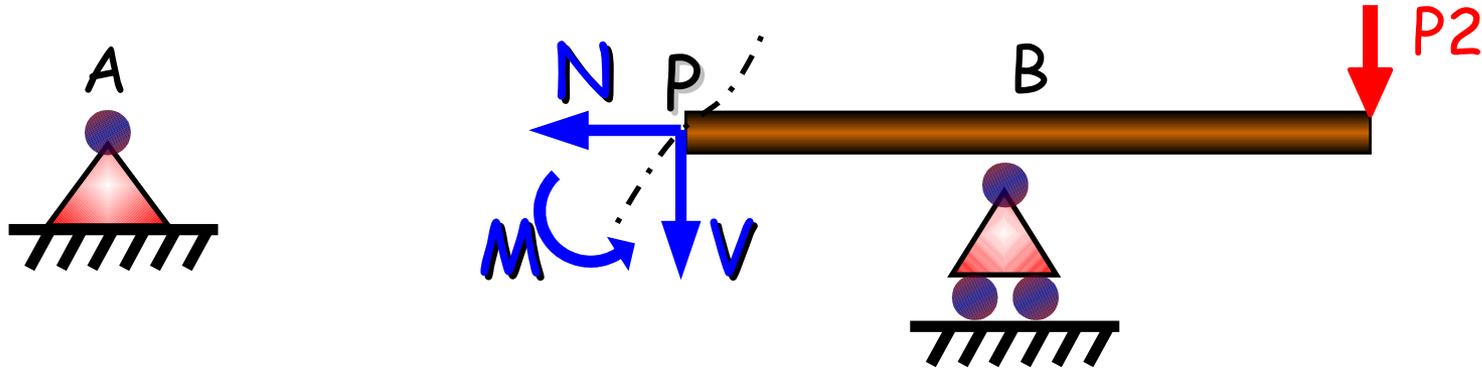


- Effort normal N: traction ou compression
- Effort tranchant V: cisaillement
- Moment fléchissant M: flexion

Calculer les efforts intérieurs

Méthode de calcul:

Résolution des équations d'équilibre d'un des fragments.

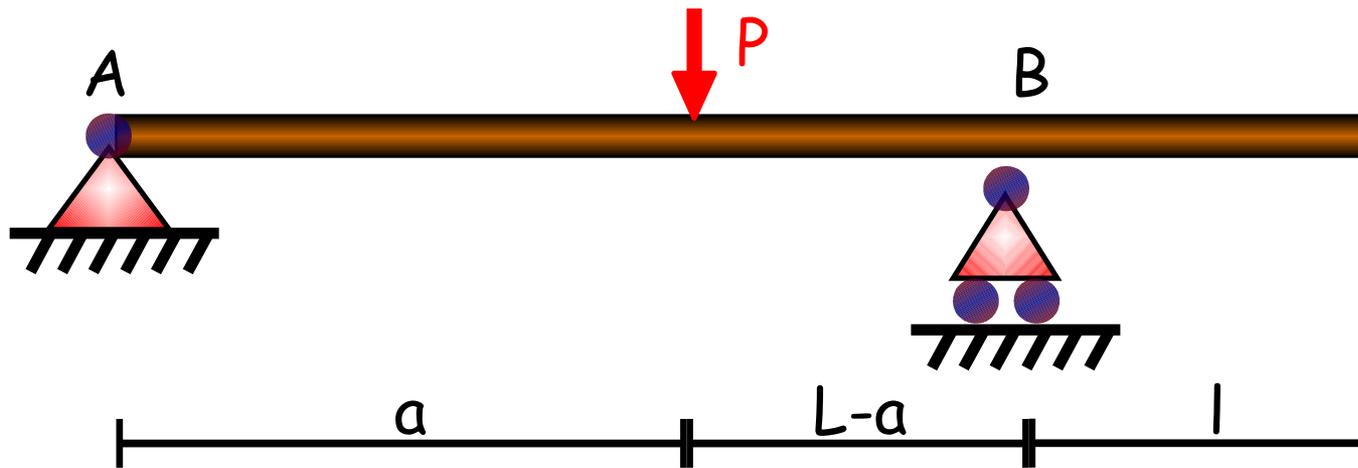


En pratique:

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \sum_{\text{droite}} F_x \\ V = \sum_{\text{droite}} F_y \\ M = \sum_{\text{droite}} (r_x F_y - r_y F_x) + \sum_{\text{droite}} M \end{array} \right.$$

Exemple d'application

- Calcul des efforts intérieurs dans une poutre en cantilever sous l'action d'une charge mobile.

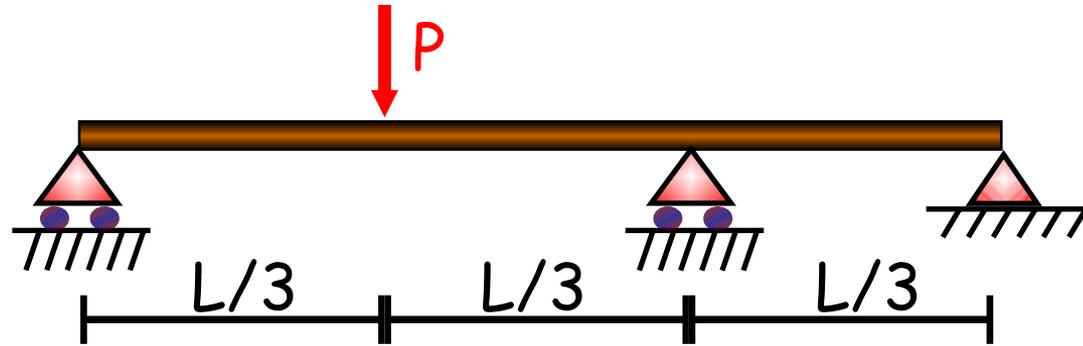


Analyse des structures hyperstatiques

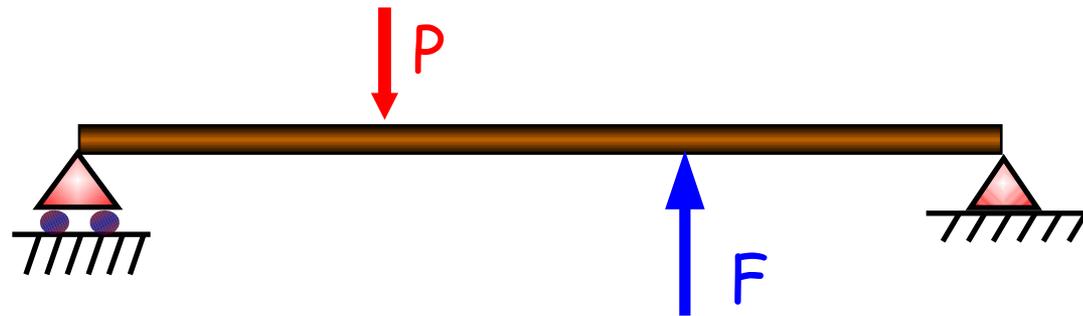
- Dans les structures hyperstatiques, il y a plus d'efforts inconnus que d'équations d'équilibre; il faut donc **prendre en compte la compatibilité géométrique** des déformations de la structure au niveau des appuis et des liaisons.
- Se reporter à une ou plusieurs structures isostatiques associées et déduire des efforts approchés.

Coupure d'un appui

Structure hyperstatique:



Structure isostatique associée,
avec une force inconnue hyperstatique F :



Avantages/inconvénients de l'hyperstaticité

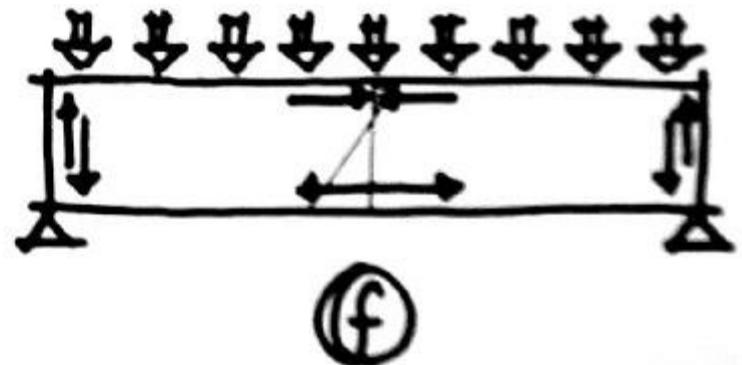
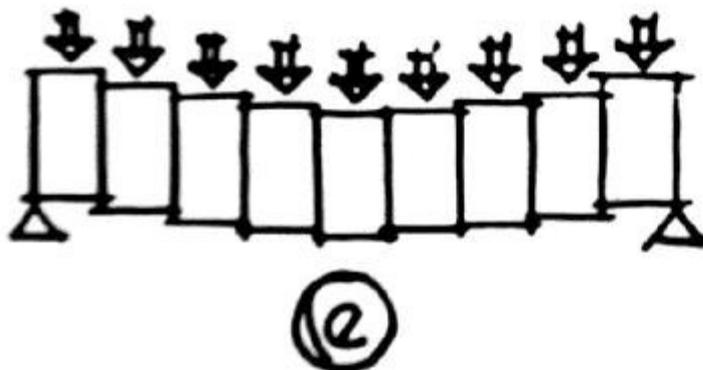
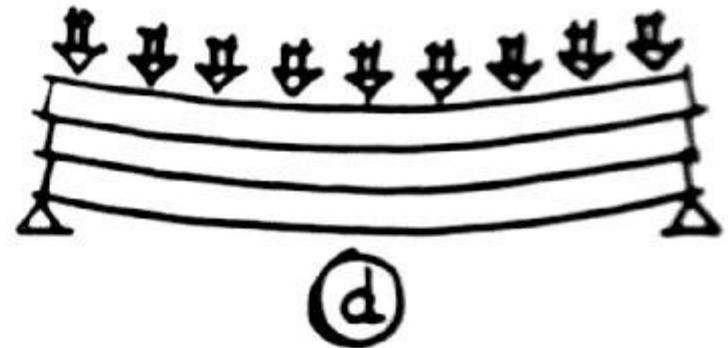
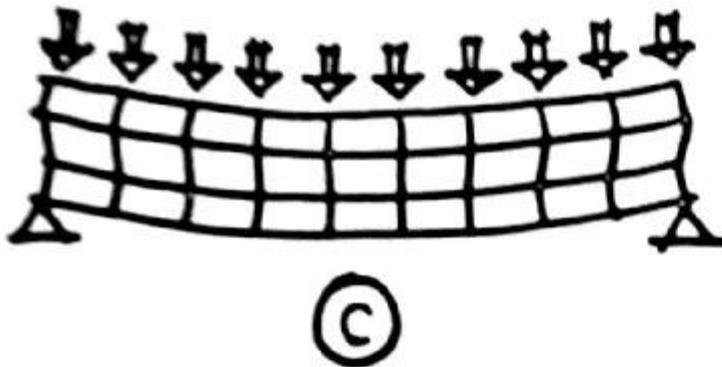
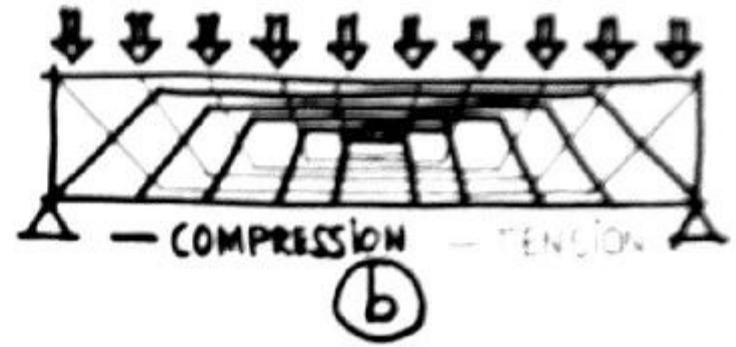
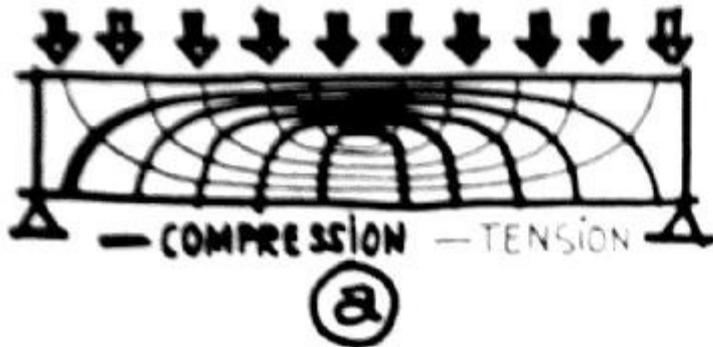
Les structures isostatiques sont:

- plus faciles à monter,
- insensibles aux tassements différentiels,
- insensibles aux variations de températures.

Les structures hyperstatiques sont:

- plus rigides,
- plus économes en matériaux (en général),
- plus sûres grâce à un certain degré de redondance.

Comment résister? En se déformant.



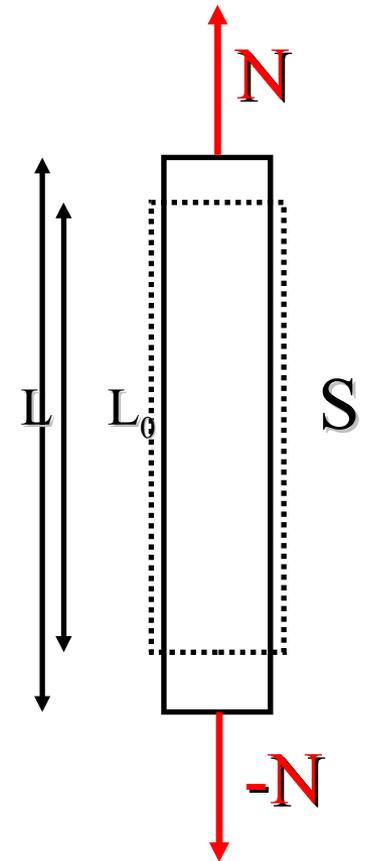
Déformation, effort normal et élasticité

La variation de longueur est:

- proportionnelle à la longueur;
- proportionnelle à la charge;
- inversement proportionnelle à la section.

Loi de Hooke
$$\sigma = \frac{N}{S} = E \frac{L - L_0}{L_0} = E \varepsilon$$

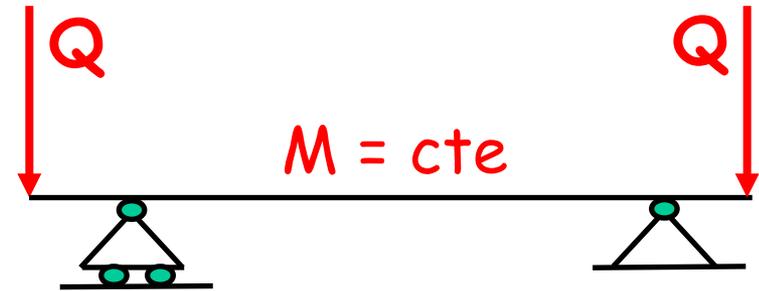
- σ : Contrainte axiale (en MPa)
- ε : Déformation axiale (en %)
- E : Module d'Young (en GPa)



Déformation et moment fléchissant

Flexion constante

=> rayon de courbure ρ constant



Longueur initiale: $L = \rho\theta$

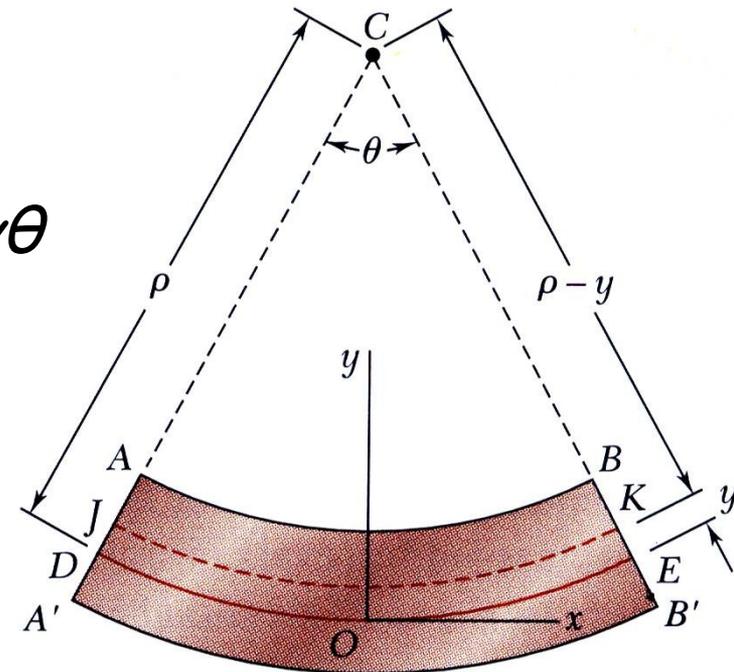
Longueur déformée: $L' = (\rho + y)\theta$

Variation de longueur

$\Delta L = L - L'$ soit $\Delta L = (\rho + y)\theta - \rho\theta = y\theta$

Déformation: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{y}{\rho}$

La déformation est linéaire en fonction de la distance à l'axe neutre.

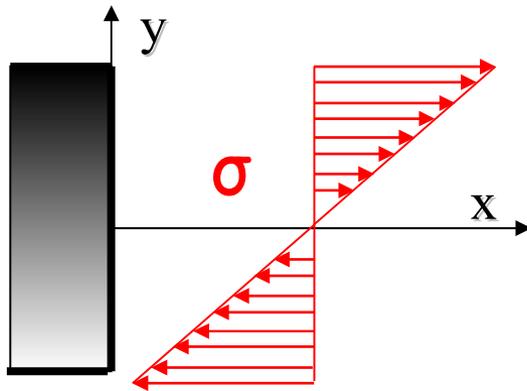


Contrainte de flexion

Comportement élastique: $\sigma = E \varepsilon = E \frac{y}{\rho}$

Contrainte maximale: $\sigma_{max} = E \frac{y_{max}}{\rho}$

Si le comportement de la poutre est **élastique linéaire**,
la **contrainte varie linéairement** avec la distance à l'axe.



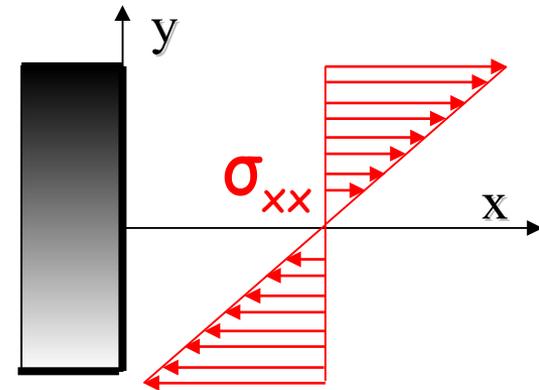
$$\sigma = \frac{y}{y_{max}} \sigma_{max}$$

Optimisation des sections des éléments

Les passerelles sont des structures principalement fléchies.

La matière résiste mal en flexion.

$$\sigma_{max} = \frac{M y_{max}}{I}$$



Il faut donc:

- Répartir la matière pour mieux résister à la flexion.
 - Mettre de la matière là où la flexion est importante.
- => Varier l'inertie en fonction du moment fléchissant.

Calcul pratique des inerties

Formules connues:

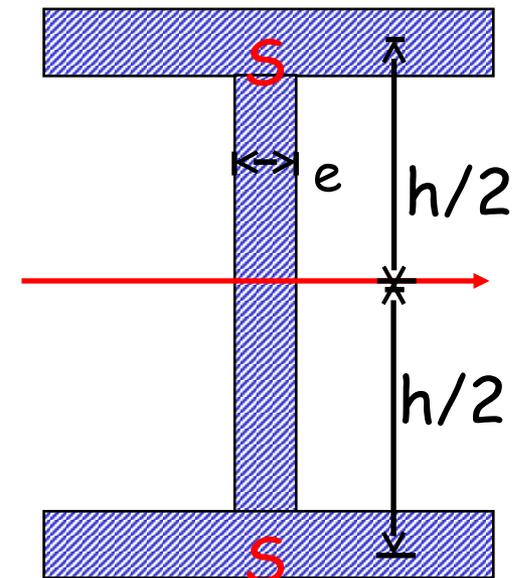
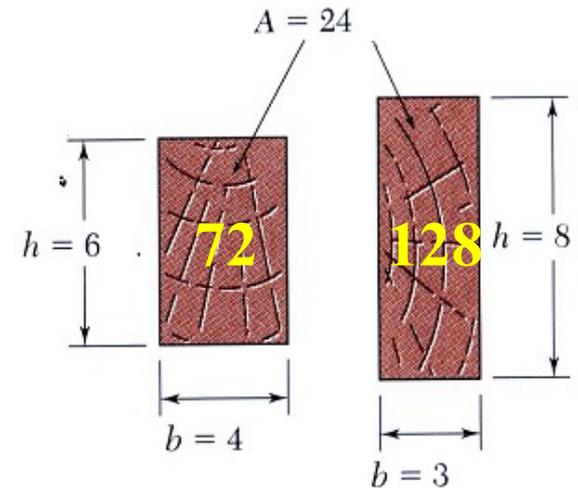
- rectangle: $I = \frac{bh^3}{12}$
- cercle: $I = \frac{\pi D^4}{64}$

Méthodes de calcul:

- Addition / soustraction.
- Théorème de Huygens:
 $I \approx \text{somme} (y^2 S)$

Application: poutre en I

$$I \approx 2 \left(\frac{h}{2} \right)^2 S + \frac{eh^3}{12}$$



Pont routier près de Nancy



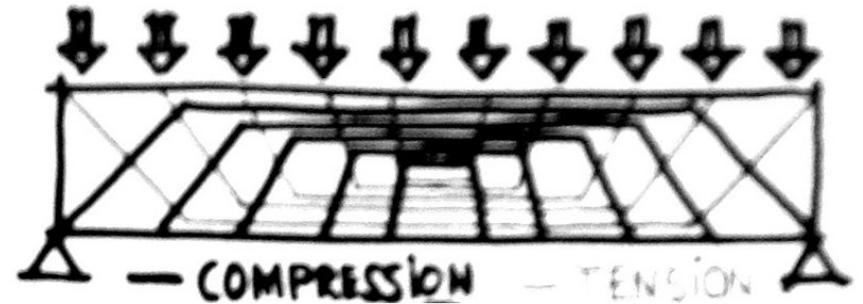
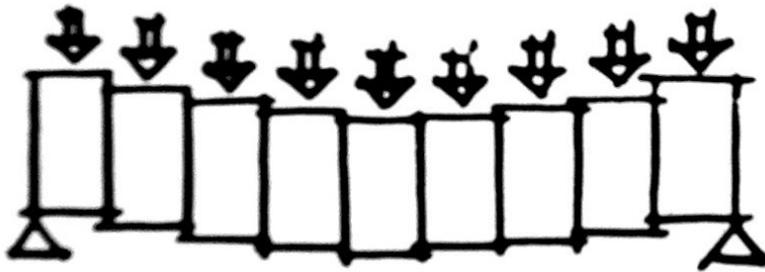
Passerelle Mahlbusen, Rostock, All., 2002

Arch. WES & Partner, Ing. Schlaich Bergermann und Partners

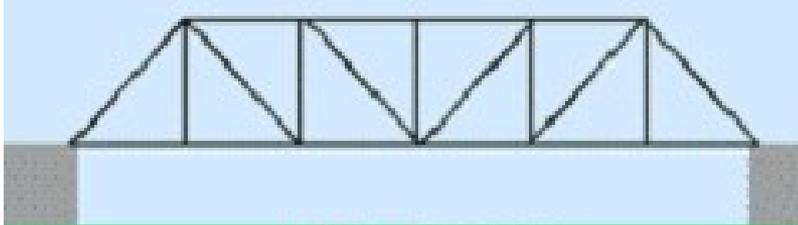


De la poutre au treillis

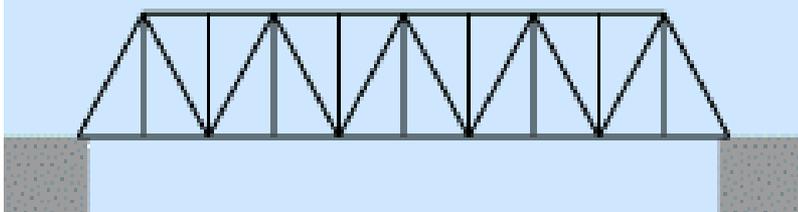
- Fibres supérieures et inférieures reprennent les moments.
- Fibres médianes ne reprennent que l'effort tranchant.



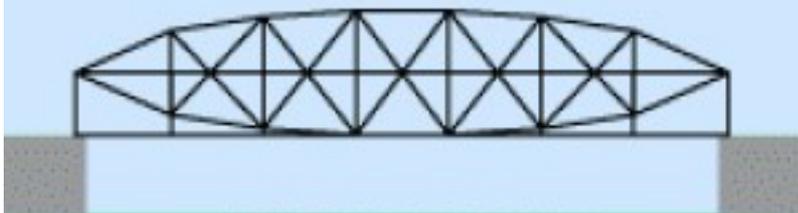
- Décomposition de la section en éléments qui remplissent les mêmes fonctions.
- A performances égales, structures plus légères.
- Grande transparence de la structure.



PRATT



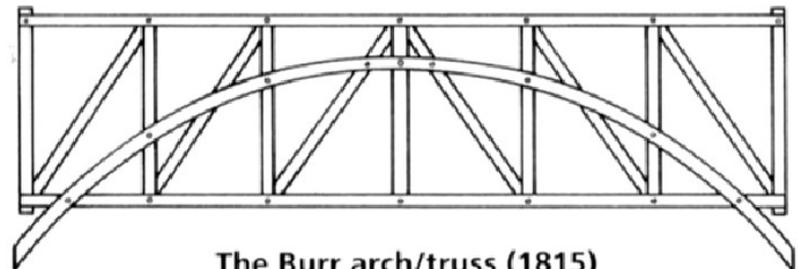
SUBDIVIDED WARREN TRUSS



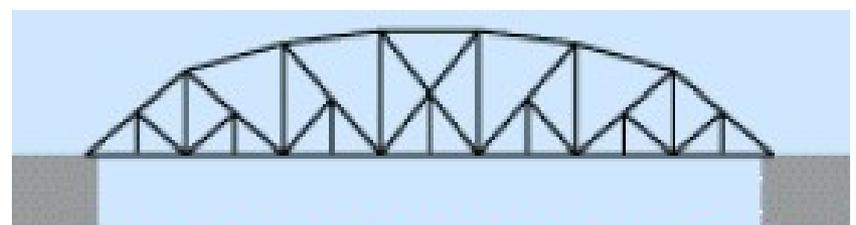
LENTICULAR TRUSS



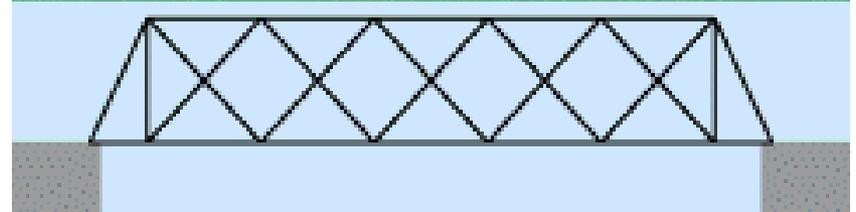
CANTILEVER THROUGH TRUSS



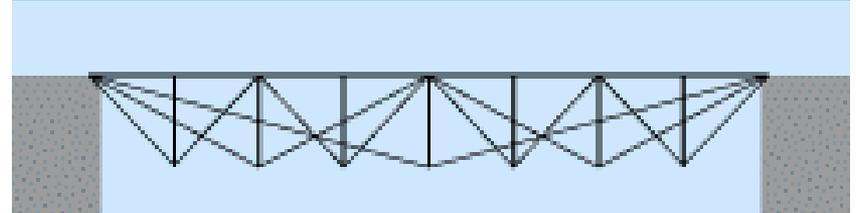
The Burr arch/truss (1815)



PENNSYLVANIA-PETIT (PRATT) TRUSS



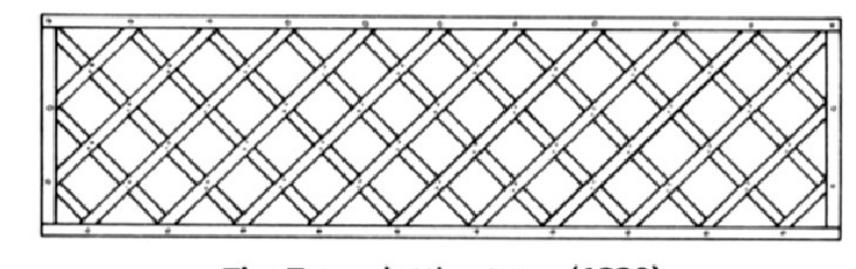
DOUBLE WARREN TRUSS



FINK TRUSS



WICHERT TRUSS

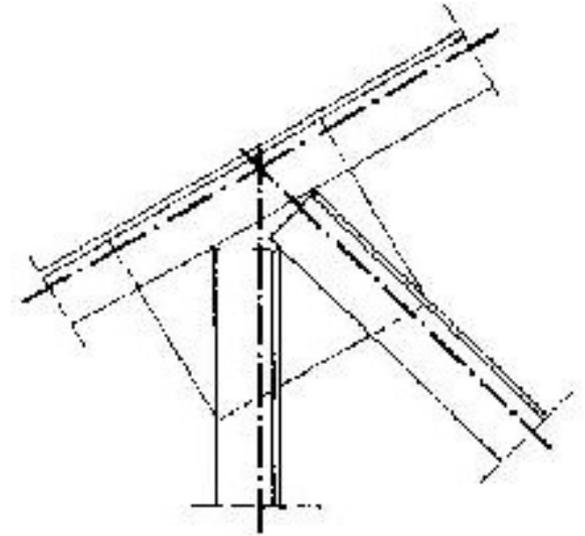


The Town lattice truss (1820)

Caractéristiques statiques des treillis

Hypothèses principales:

- barres droites
- articulations parfaites;
- axes des barres concourants;
- actions extérieures aux nœuds.

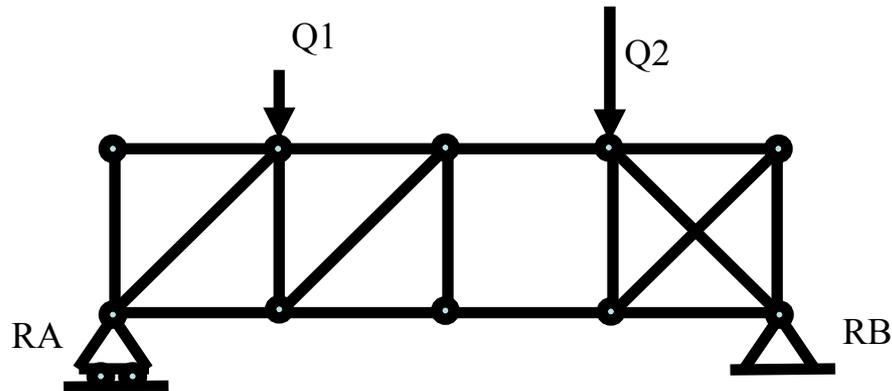
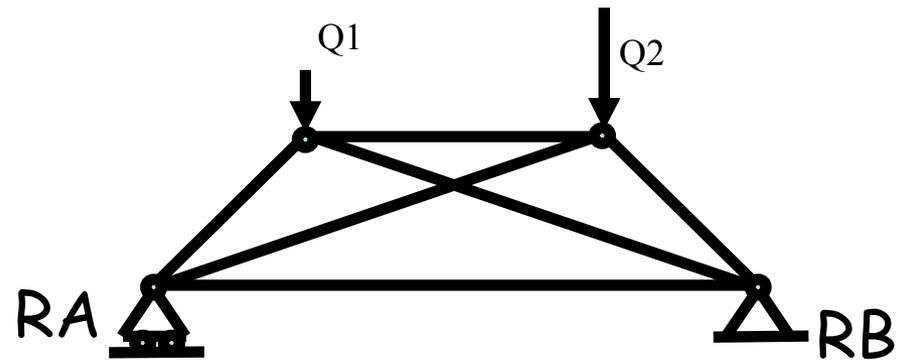
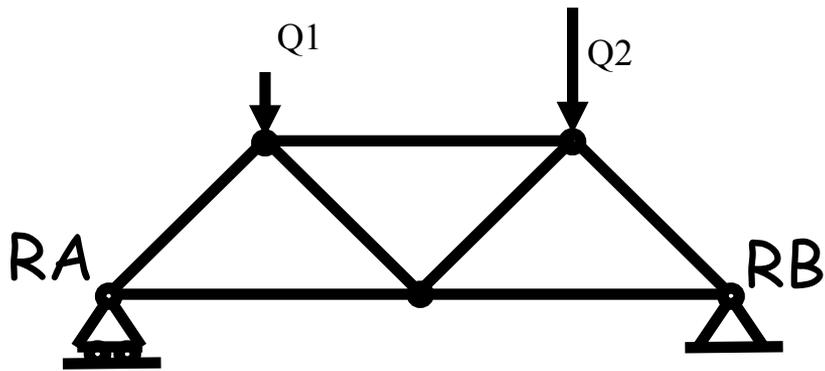


=> Il n'y a que de l'effort normal dans les barres.

Isostaticité et hyperstaticité:

- les mêmes principes restent valables.
- les triangles sont les seules figures isostatiques stables.

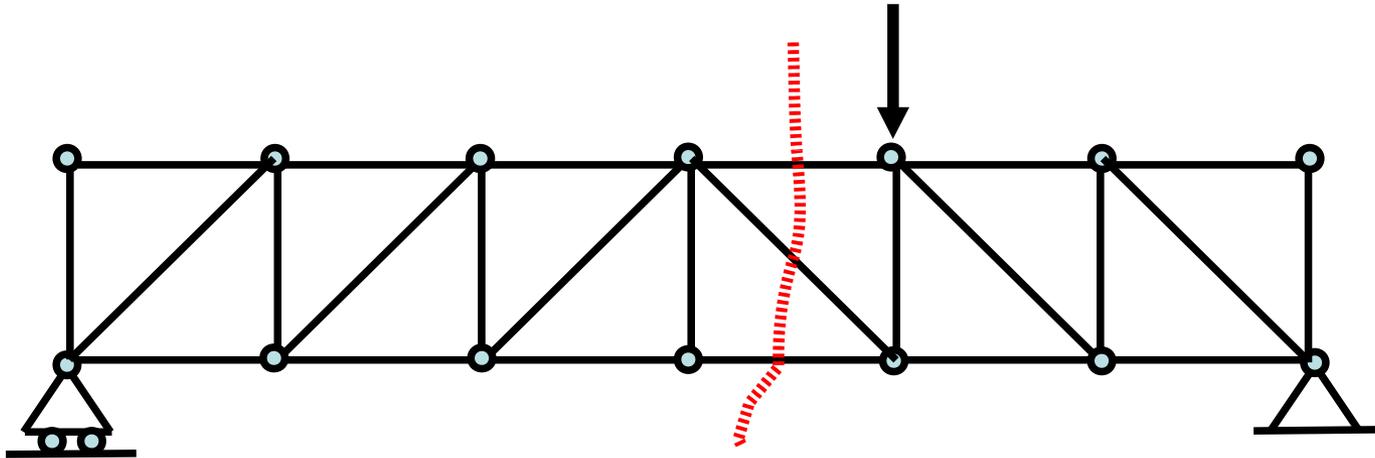
Stabilité des treillis



Treillis: Méthode des coupures

Principe:

- Mettre en évidence les efforts recherchés par une coupure.
- Écrire les équations d'équilibre de l'ensemble isolé par la coupure.



Remarques sur la méthode des coupures

- Les équations d'équilibre sont indépendantes de l'emplacement de la coupure sur chaque élément.
 - Les membrures supérieures et inférieures reprennent le moment fléchissant.
 - Les diagonales et les montants reprennent l'effort tranchant.
- => Les efforts dans les treillis se déduisent facilement des efforts intérieurs dans la poutre équivalente.

Roseman bridge, Iowa, États-Unis, 1883

Cstr.
B. Jones



Port de Besos, Barcelone, Espagne, 2004



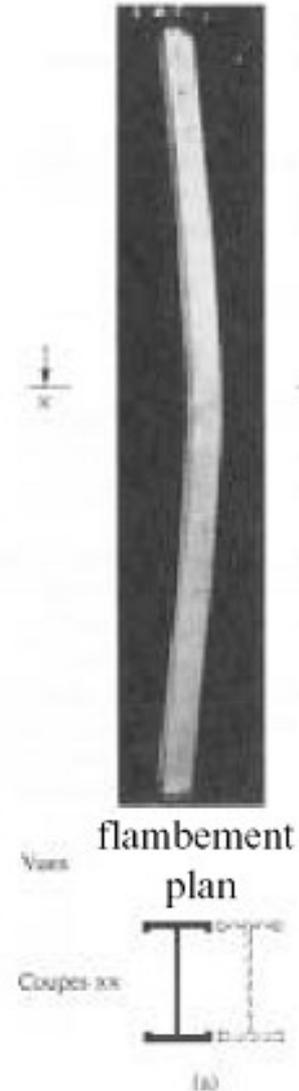
Sidney Harbour Bridge, 1923



Concepteur Sir Ralph Freeman

Stabilité des éléments comprimés

- Le critère de rupture n'est pas suffisant pour assurer la bonne tenue d'un ouvrage.
 - Les pièces comprimées ont tendance à se dérober à l'effort de compression en fléchissant latéralement.
- => Nécessité d'un critère de stabilité



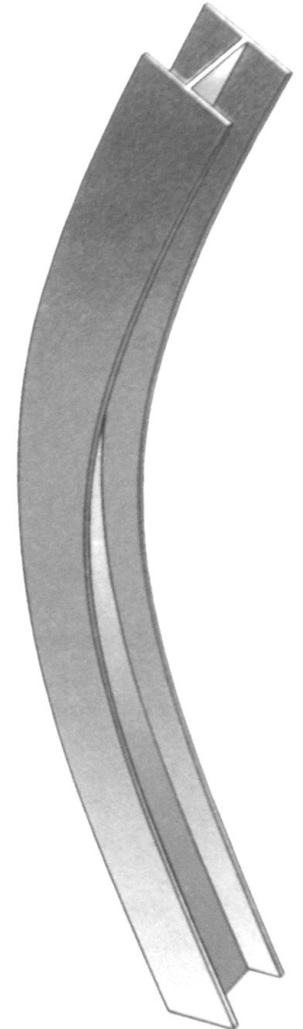
Flambement

Théorie d'Euler (1744)

Charge critique d'Euler

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2}$$

- Proportionnel à EI
(module de rigidité en flexion)
- Quel I ? Le plus faible!
- L_k : Longueur de flambement
(dépend des conditions d'appui).



Évaluer la longueur de flambement



$$L_k = L$$

$$P_{1,cr}$$



$$L_k = 0.7 L$$

$$P_{2,cr} = 2 P_{1,cr}$$



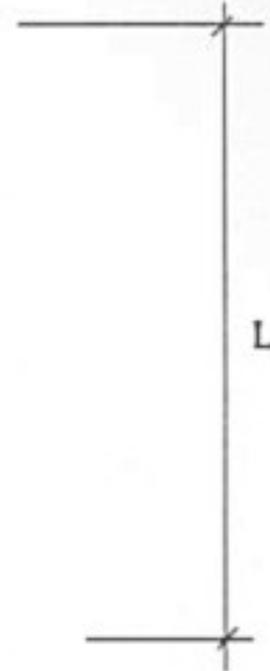
$$L_k = 0.5 L$$

$$P_{3,cr} = 4 P_{1,cr}$$



$$L_k = 2 L$$

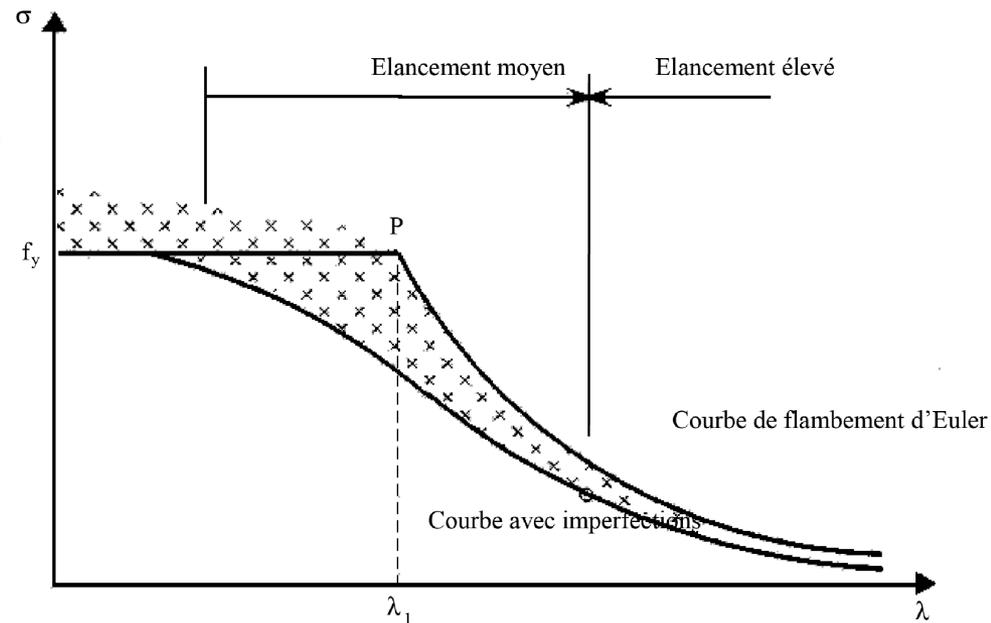
$$P_{4,cr} = 0.25 P_{1,cr}$$



Influence des imperfections

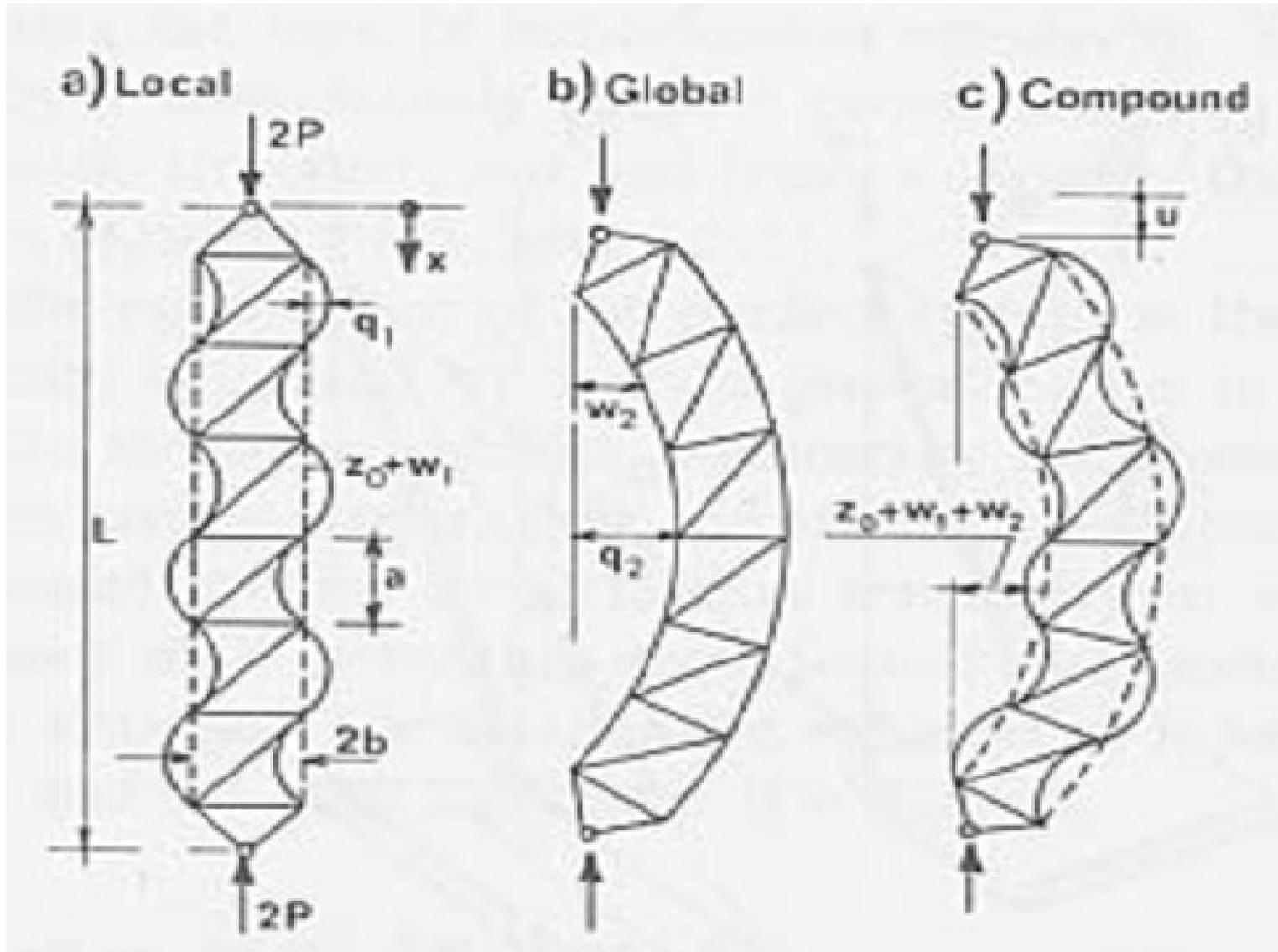
Origine des imperfections:

- excentricité des charges,
- courbure initiale;
- Variabilité des sections;
- Variabilité du matériau;
- Contraintes résiduelles.



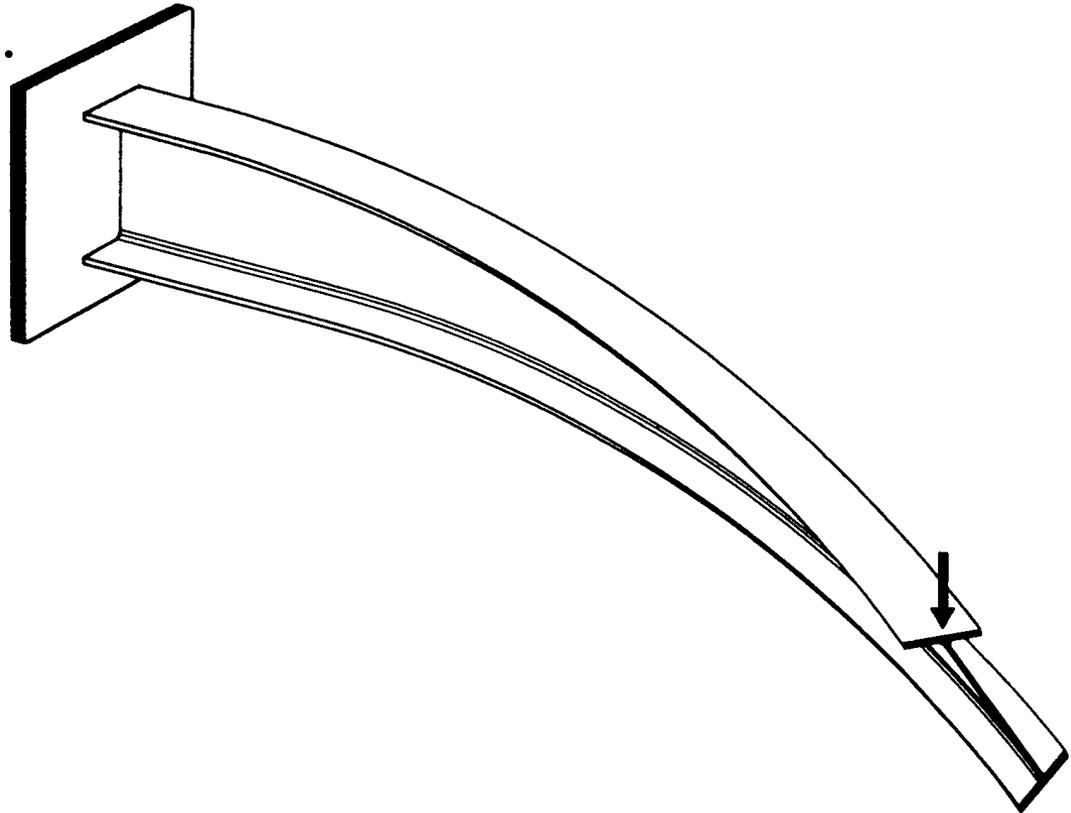
Il est recommandé de garder un facteur de sécurité de 0,5 par rapport à la force critique d'Euler.

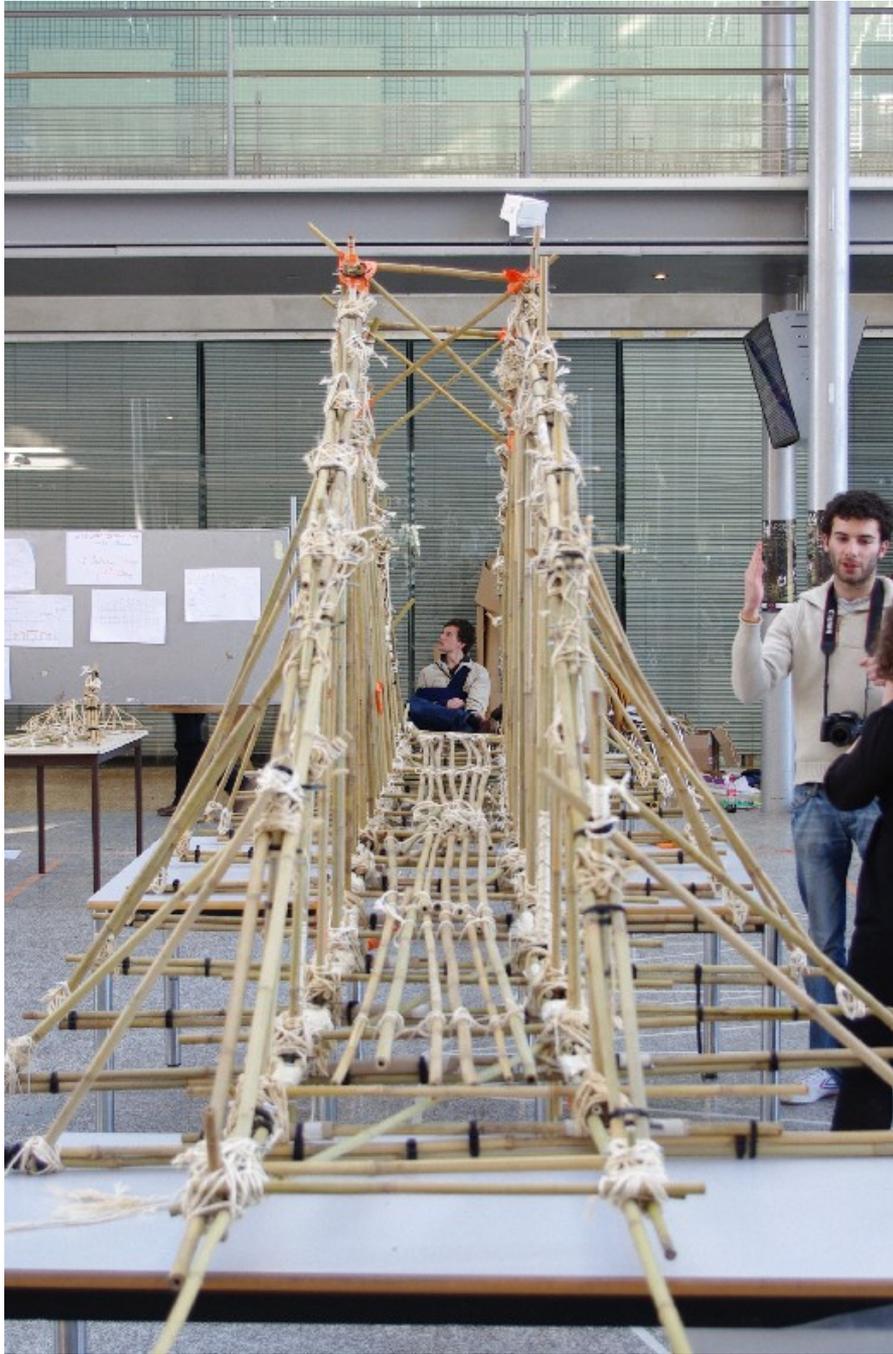
Flambement des structures complexes



Déversement

- Instabilité de flexion-torsion
=> flexion latérale couplée avec une torsion de l'axe.
- Origine: Flambement de la partie comprimée de l'élément fléchi.





Vérification des poutres au déversement

Un phénomène complexe qui prend en compte les raideurs en flexion et en torsion de l'élément.

=> Vérification simplifiée du non-flambement de la partie supérieure de la poutre.

1) Calcul de l'effort de compression:

$$N_{\max}^{\text{fibre sup}} \cdot h = M_{\max}^{\text{flexion}}$$

2) Comparaison avec la force critique de la sous-section:

$$N_{\max}^{\text{fibre sup}} \leq \frac{\pi^2 E I^{\text{fibre sup}}}{L_k^2} \quad \text{avec } L_k : \text{longueur libre de la fibre sup}$$

Organisation de la semaine

- Lundi 10h15-12h30: « Franchir mon pont ! »
- Lundi 14h → Mardi 12h: Projet (phase Esquisse & APS)
- Mardi 13h-15h: Correction collective
- Mardi 15h → Mercredi 18h: Projet (phase PRO)
- Mercredi 14h → 18h: Visa des plans par enseignants
- Jeudi → Vendredi 10h: Fabrication
- Vendredi 14h: Jury

Phase d'esquisse : lundi a-m

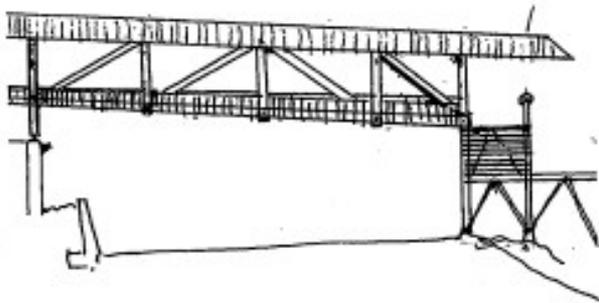
14h00-14h30 : Analyse du sujet par équipe de 6

14h30-15h30 : Répartition en binômes et développement de deux propositions (esquisse + schéma statique).

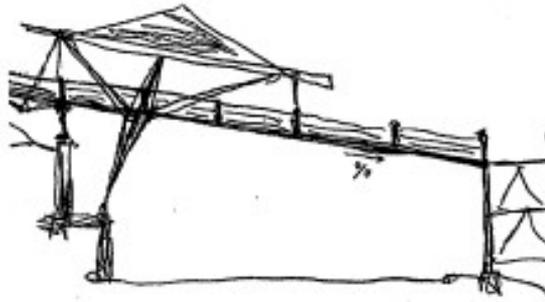
=> rendu de deux planches ESQUISSE par binôme.

15h30-16h30 : Concertation en équipe pour sélection des deux solutions les plus pertinentes.

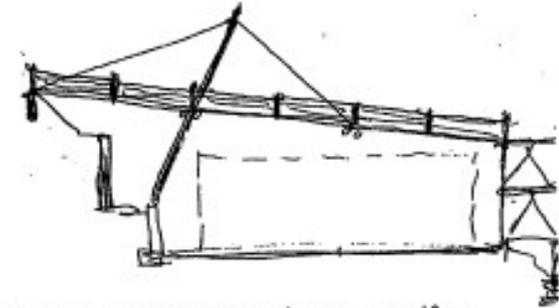
Croquis d'ingé pour le pont de Ballaigues



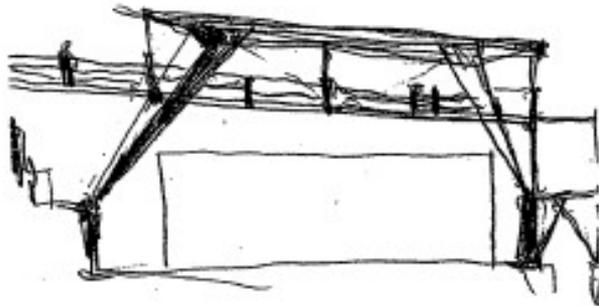
système triangulé avec toit



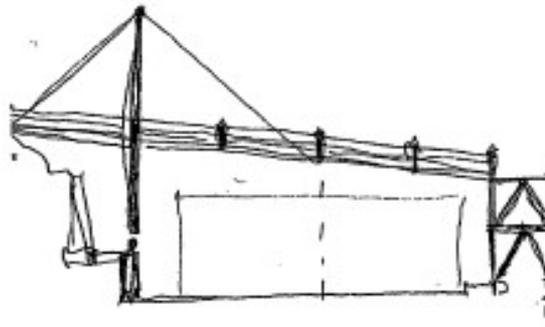
construction en forme de parapluie avec suspension et couverture partielle



construction haubanée avec pylône incliné



portique et couverture partielle



construction haubanée avec pylône vertical

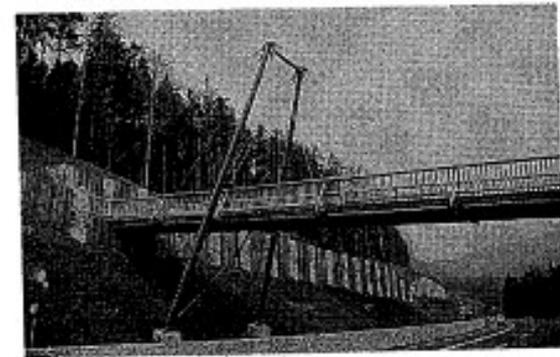


photo du projet réalisé

ESQUISSE

NOT / CONCEPT:

LE DÉFI

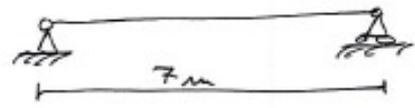
* avantages
→ c'est rapide

* inconvenient
→ c'est beaucoup
→ gros efforts
→ importance des détails

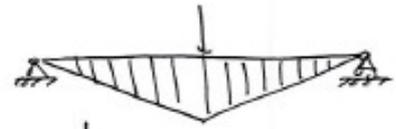
* potentiel
→ variantes

* limites
→ originalité faible

schéma statique



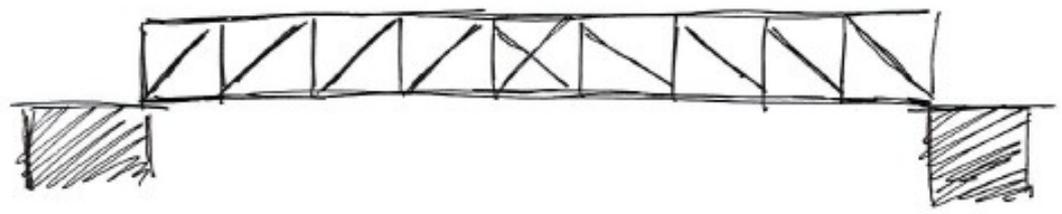
(17)



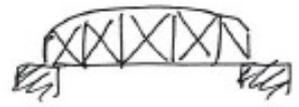
! charge mobile



Esquisse



variantes:
(x3)



Phase d'esquisse : lundi a-m

16h30-18h : Développement des deux solutions retenues:

- Réflexion sur la géométrie de l'ouvrage
- réflexion sur la réalisation des inerties,
- proposition de variantes,
- analyse des efforts.

=> rendu de deux planches ESQUISSE détaillées.

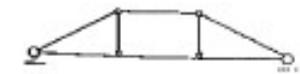
Systèmes à tirants



ferme à un poinçon



poutre sous-tendue



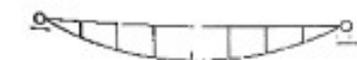
ferme trapézoïdale à deux poinçons



poutre à deux sous-tirants



poutre à trois sous-tirants



poutre à sous-tirants multiples

Poutres continues



système standard



avec articulation



système encastré



poutres croisées sur appui



poutre renforcée

Contre-fiches



aisseillers simples



aisseillers cintrés



arbalétriers en V



faisceau d'arbalétriers



ouvrage à contre-fiches



ouvrage à contre-fiches multiples



ouvrage à contre-fiches avec aisseillers

avec aisseiller



avec double aisseiller
portée jusqu'à 20 m



triangulation



poinçon et sous-tirants



système triangulé
portée jusqu'à 50 m



système haubané



système à haubans parallèles
portées jusqu'à 80 m

Phase d'avant-projet: mardi

8h30-10h : Choix de la solution à retenir
(avec les enseignants).

10h00-12h30 : Définition de la solution retenue

- Plan/coupe/élévation à l'échelle 1:20,
- maquette d'étude à l'échelle 1:20,
- emplacement du passage,
- analyse des efforts,
- liste des détails à étudier,
- points de conception particuliers à étudier en phase PRO.

=> rendu des planches APS₁ et APS₂ + maquette.

Dessins à la main et à l'échelle

Élévation:

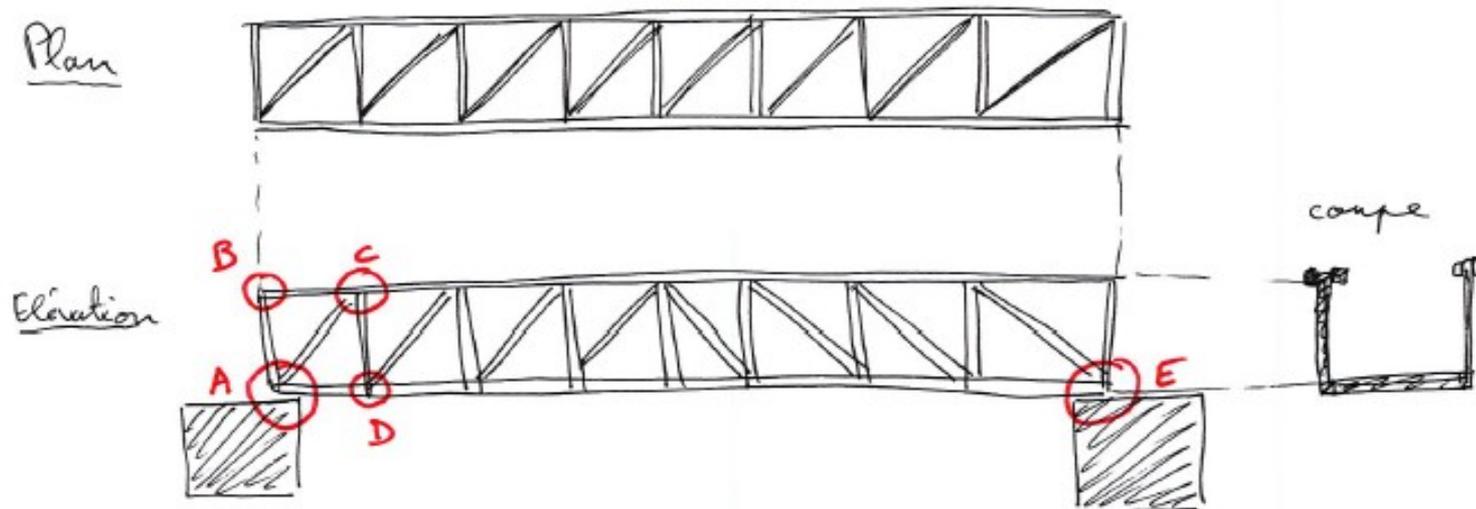
- Répartition des pleins et des vides
- Rapport au sol
- Rapport entre structure porteuse et tablier
- Choix structurels fondamentaux

Plan

- Stabilité latérale
- Rapport aux chemins d'accès
- Dynamique spatiale

LE DÉFI

AP S1



* Plan/Coupe/Élévation: échelle 1:20

* Plaquette: 1:20

* liste des points particuliers de conception, montage.

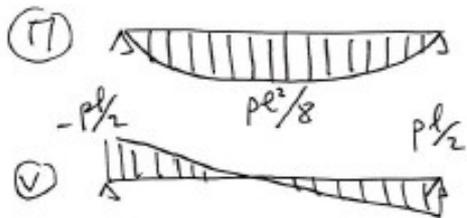
* liste des détails à concevoir

- A: Appui glissant sur support + tablier + poutre
- B: Membrane comprimée sans diagonale
- C: Membrane comprimée avec diagonale
- D: Membrane tendue + diag + tablier (hors plan)
- E: Appui fixe + tablier + poutre

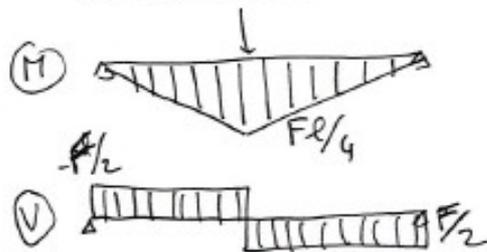
LE DÉFI : Analyse des effets

APS2
PRO5

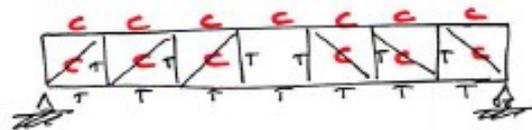
* Poids propre:



* Charge concentrée

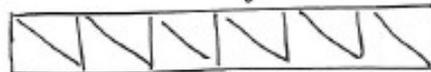


* Efforts dans les treillis:

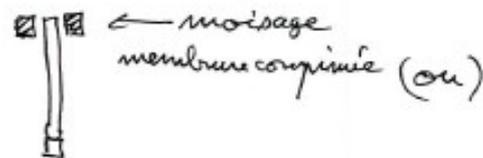


* Stabilisation / contreventement

• Fabrics triangulé



• Déversement des poutres



• Torsion (voir déversement)



Phase d'avant-projet: mardi

13h30-15h00 : Correction collective des projets
(10 min. présentation + 10 min. questions)

15h30-16h00: Organisation des équipes pour la phase PRO :

- 1 chef de projet
- 1 responsable plans
- 1 responsable calcul
- 1 responsable chantier
- 1 responsable méthode
- 1 responsable détails

Phase de PRO: mardi - mercredi

- Définition de la géométrie finale,
- Description du fonctionnement de la structure (cheminement des efforts et stabilisation),
- Conception des détails d'exécution avec réalisation de prototypes:
 - Techniques de nœud
 - Continuité, inertie des éléments
 - Plusieurs éléments dans le plan
 - Plusieurs éléments dans l'espace
 - Appuis et liaisons internes

Phase de PROjet: mercredi

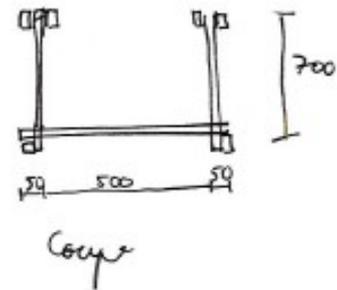
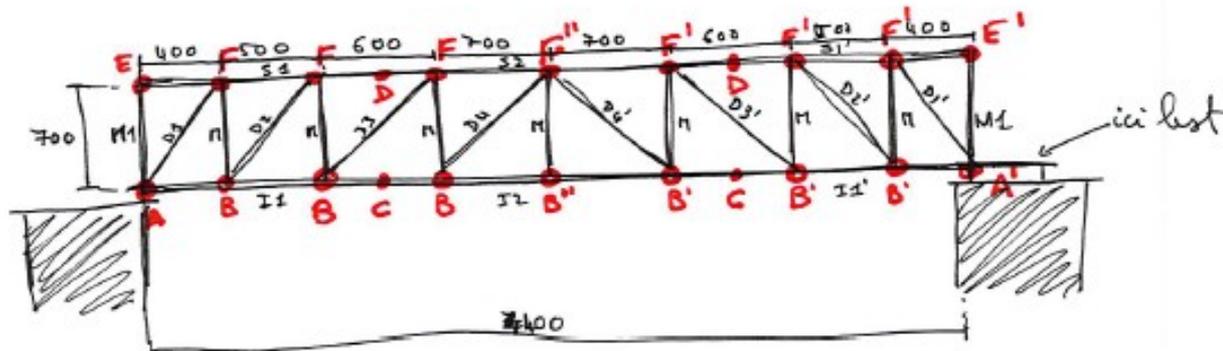
- 11h-18h : Réalisation des plans d'exécutions, des plans de détails, définition des nomenclatures, organisation du chantier et du montage:
 - Ordre des opérations,
 - Assemblage des éléments,
 - Découpage en sous-structure ou non,
 - Transmission du savoir technique,
 - Uniformisation des méthodes, etc....

=> rendu des planches PRO1 à PRO5.
- 14h-18h : Validation des plans par les enseignants avant fabrication.

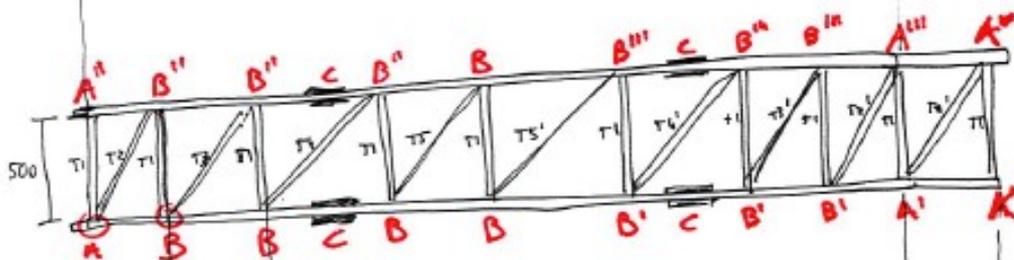
LE DÉFI : Plans d'exécution. [Nomenclature + côtes]

échelle 1:20

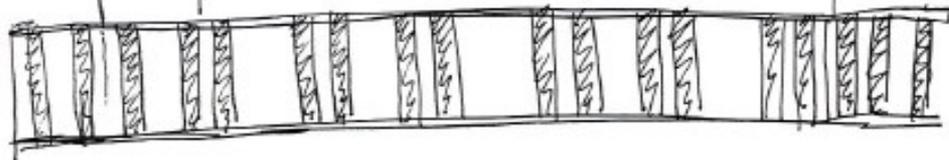
Élévation



Plan tablier



Plan platelage



liste des pièces

- M: Pontant $l = 650 \text{ mm}$
 M': Pontant sur appui $l = 750 \text{ mm}$.
 D1: diagonale n°1 $l = 802 \text{ mm}$
 D1': sym de diag n°1 $l = 802 \text{ mm}$
 D2: diagonale n°2 $l = 860 \text{ mm}$

⋮

- I1: Membrane inférieure n°1 $l = 1200 \text{ mm}$
 I1': Membrane n°1 inf sym
 I2: Membrane inférieure centrale $l = 2000 \text{ mm}$.

- S1: Membrane sup n°1 : doublée $l = 1200 \text{ mm}$
 S1': sym "
 S2: Membrane centrale n°2 triplée $l = 2000 \text{ mm}$.

+ tablier : structure + platelage

+ stabilisation si nécessaire

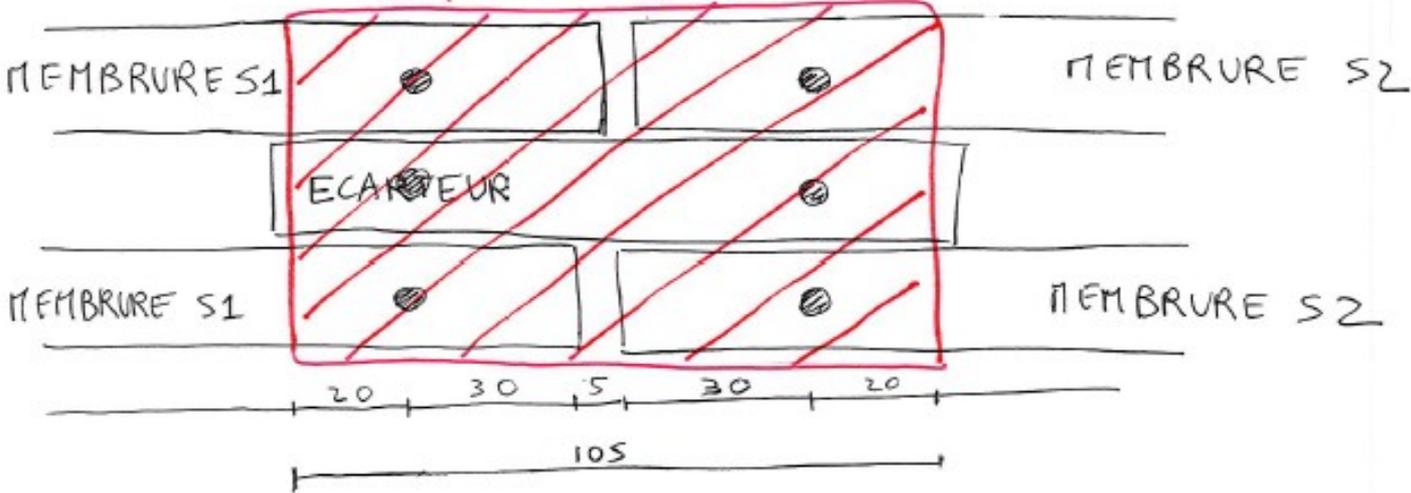
liste des détails

- A: appui sur table
 A': idem avec lest.
 B: membrane inférieure + jonction tablier.
 B': idem sym.
 B'': idem central
 C: Continuité membrane inférieure
 D: Continuité membrane supérieure
 E: Extrémité haute
 F: membrane double supérieure
 F': idem sym.
 F'': idem centre
 + etc...

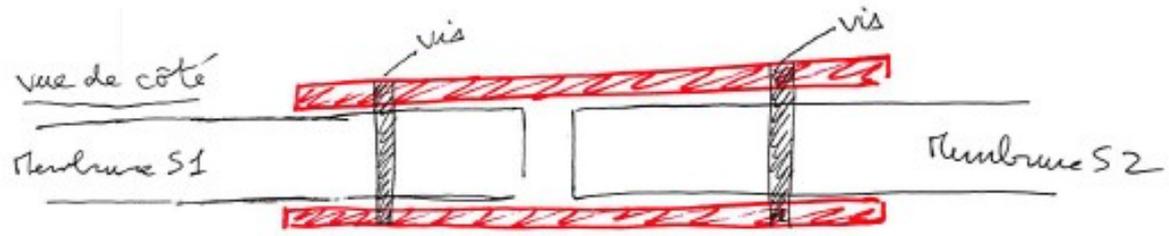
Détail D: vissé collé

vue de dessus

plaque contreplaqué

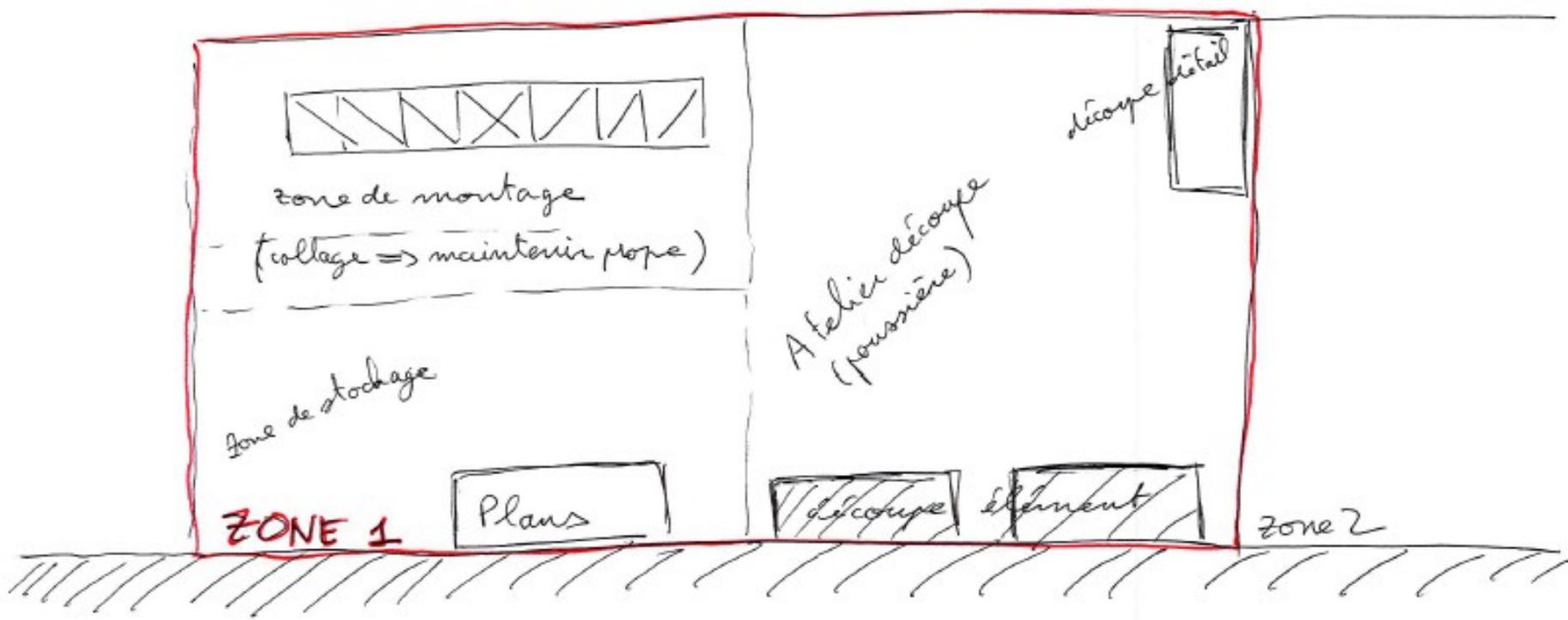


vue de côté



Organisation du chantier

PRO 4



Fin de la semaine

Jeudi : Construction de la structure

Vendredi mat.:

- tests de chargement et éventuellement reprise de détails,
- Pesage,
- Nettoyage
- Préparation du rendu

Vendredi a-m:

- Jury,
- Conférence de clôture et remise des prix