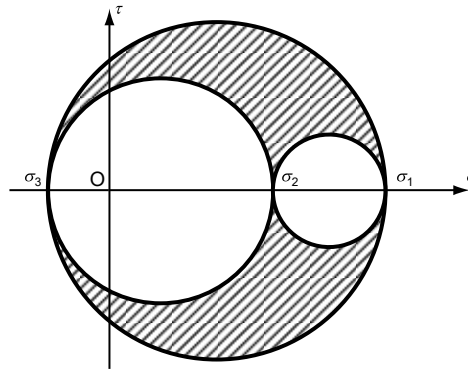


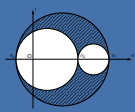
Mécanique des structures



Chapitre 0: Introduction

Dr. Alain Prenleloup
SGM BA3 2024-2025

EPFL



Cours : sur site + zoom : <https://epfl.zoom.us/j/62407280941>

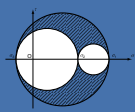
- Alternance théorie et exemples

Exercice : sur site

- 1 heure le mercredi de 11h – 12h

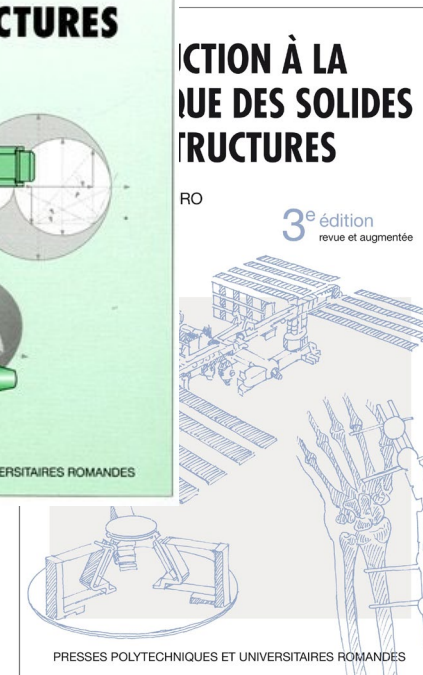
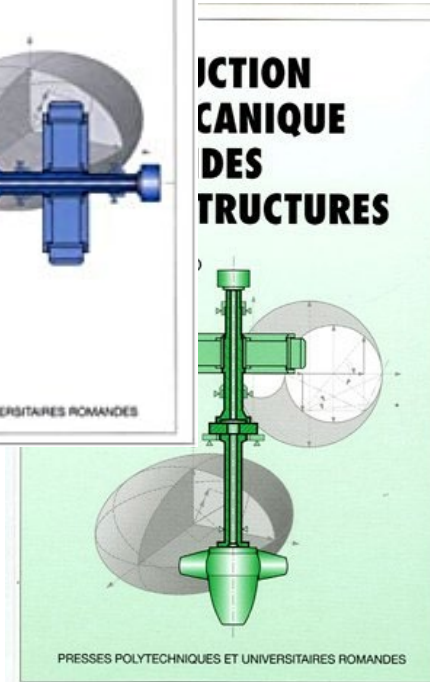
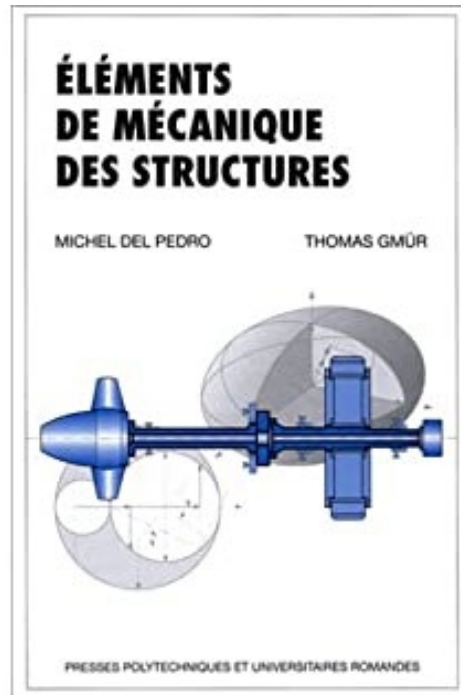
Support de cours : Moodle

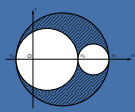
- Slides du cours
- Série d'exercice
- Corrigé des exercices (mise en ligne le vendredi)
- Série d'exercice supplémentaire (réponse, sans corrigé détaillé)



Chapitre 0 : Introduction

Support de cours





Objectif :

- Midterm : ne pas attendre la fin du semestre pour assimiler les notions
- Examen : synthèse des compétences acquises

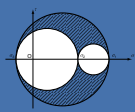
Notation

- | | |
|---|----------------|
| • Examen de 90 minutes en semaine 9 (11 nov.) | 30% de la note |
| • Examen final en session d'examen | 70% de la note |

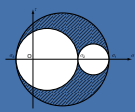
Matériel

- Midterm : open-book (uniquement support de cours)
- Examen : formulaire personnel A4 recto-verso

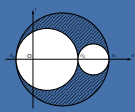




0. Introduction
1. Équilibre intérieur des solides
2. Traction ou compression simple
3. Etat de contraintes bidimensionnel
4. Cisaillement simple
5. Torsion simple
6. Flexion des poutres droites
7. Déformée des poutres droites en flexion simple
8. (Flexion dérivée et flexion composée)
- ~~9. Flexion des poutres courbes~~
10. Energie de déformation
11. Systèmes hyperstatiques
12. Flambage des poutres
13. Analyse de l'état de contrainte et de déformation
- ~~14. Élément d'élasticité linéaire~~
15. Critère de rupture de l'équilibre élastique



1.	09 / 11 sept.	Ch.0-1	Introduction & ch.1	
2.	(16) / 18 sept.	Ch.1	Équilibre intérieur des solides	exo. sem-2
3.	23 / 25 sept.	Ch.2	Traction ou compression simple	exo. sem-3
4.	30 / 02 oct.	Ch.3-4	Cisaillement simple & contr. bidim.	exo. sem-4
5.	07 / 09 oct.	Ch.5	Torsion simple	exo. sem-5
6.	14 / 16 oct.	Ch.6	Flexion des poutres droites	exo. sem-6
	(21 / 23 oct.)		Vacances	
7.	28 / 30 oct.	Ch.7	Déformée des poutres	exo. sem-7
8.	04 / 06 nov.	Ch.7-8	Flexion composée	exo. sem-8
9.	11 / 13 nov.		Midterm	
10.	18 / 20 nov.	Ch.10	Energie de déformation	exo. sem-10
11.	25 / 27 nov.	Ch.11	Systèmes hyperstatiques	exo. sem-11
12.	02 / 04 déc.	Ch.12	Flambage des poutres	exo. sem-12
13.	09 / 11 déc.	Ch.15	Critère de rupture	exo. sem-13
14.	16 / 18 déc.	Ch.13	Analyse de l'état de contrainte	exo. sem-14



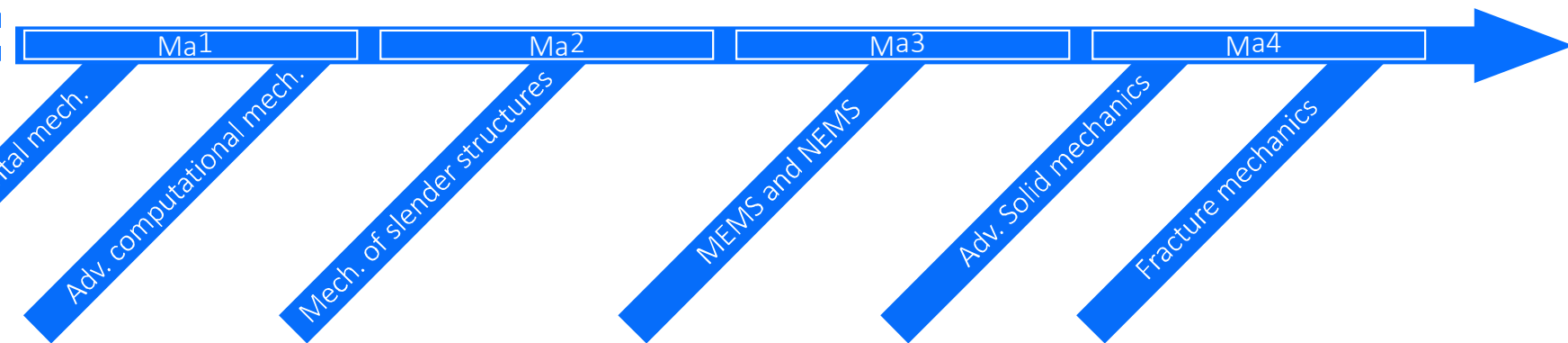
Chapitre 0 : Introduction

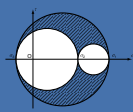
Chronologie (® ME-104)

BA:



MA:





Chapitre 0 : Introduction

Lexique et nomenclature ® ME-104

Geometry Géométrie	
Thin/Slender	Élancé
Slenderness parameter	Paramètre d'élancement
Cross-section	Section droite
Centerline	Fibre moyenne
Centroid	Barycentre
Deflection	Flèche

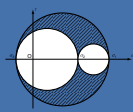
Loads Efforts	
Traction/compression	Traction/compression
Tensile/compressive force	Force de traction/compression
External force/moment/stress	Force/moment/effort extérieur(e)
Internal force/moment/stress	Force/moment/effort intérieur(e)
Normal force	Effort normal
Shear force	Effort tranchant
Bending moment	Moment fléchissant

Kinematics Cinématique	
Stretching/contraction	Étirement/contraction
Bending	Flexion
Curvature	Courbure
Twisting	Torsion
Axial stretch	Étirement axial
Axial strain	Déformation axiale

Models Modèles	
String	Fil
Beam	Poutre
Arch	Arc
Cantilever beam	Poutre console
Truss network	Treillis
Truss element	Élément d'un treillis
Plate	Plaque
Shell	Coque

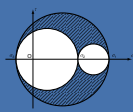
Formulation Formulation	
Virtual motion	Déplacement virtuel
Virtual internal/external work	Travaux virtuels des efforts intérieurs
Statically indeterminate/hyperstatic	Hyperstatique
Isostatic	Isostatique
Hypostatic	Hypostatique
Degree of redundancy	Deg'ree d'hyperstaticité
Method of sections	Méthode des coupures
Redundant force	Inconnue hyperstatique

Mechanical response Réponse mécanique	
buckling	Flambement
Buckling load	Charge de flambement
Bending/twisting modulus	Module de flexion/torsion



Alphabète latin

E	module d'élasticité	M_t	amplitude du moment de torsion M_t
f	flèche d'une poutre due au moment de flexion	$\mathbf{M}_f$	moment de flexion vectoriel
F	aire plane (section plane)	$\mathbf{M}_t$	moment de torsion vectoriel
F'	aire de la section partielle (contrainte de cisaillement en flexion)	n	coefficient de sécurité
F_x, F_y	faces de normale x et y	N	effort normal
F_φ	section oblique d'angle φ	s	abscisse curviligne
G	centre d'inertie d'une aire plane	S'	moment statique de la section partielle F'
G	module de glissement	S_x, S_y	moments statiques d'une aire plane selon les axes x et y
i	rayon de giration d'une aire plane par rapport à un axe donné	T	amplitude de l'effort tranchant T
i_x, i_y	rayons de giration d'une aire plane par rapport aux axes x et y	T_y, T_z	composantes de l'effort tranchant T selon les axes y et z
$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$	vecteurs unitaires selon les axes x, y et z	$\mathbf{T}$	effort tranchant vectoriel
I	moment d'inertie d'une aire plane par rapport à un axe donné	u	densité d'énergie de déformation (énergie spécifique de déformation)
I_p	moment d'inertie polaire d'une aire plane	U	énergie de déformation élastique
I_x, I_y	moments d'inertie d'une aire plane par rapport aux axes x et y	v	variation relative de volume
I_{xy}	moment centrifuge d'une aire plane par rapport aux axes x et y	W_p	moment de résistance polaire d'une aire plane (moment de résistance à la torsion)
k	rigidité d'un ressort	W_1, W_2	moments de résistance à la flexion
M	moment de flexion	x, y, z	axes de référence
$M_A, \dots$	moments appliqués aux points $A, B, \dots$	X, Y, Z	axes principaux
M_f	amplitude du moment de flexion $\mathbf{M}_f$	y	déformée due au moment de flexion
M_{fy}, M_{fz}	composantes du moment de flexion $\mathbf{M}_f$ selon les axes y et z	y'	pente de la déformée d'une poutre
		y''	courbure de la déformée d'une poutre



Alphabète grec

α	coefficient de dilatation thermique
γ	angle de glissement
	angle de glissement global en flexion
δ	amplitude de déformation
δ	déplacement
ε	allongement spécifique
ε_B	dilatation de rupture
ε_t	allongement transversal relatif
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	déformations selon les axes x, y et z
μ	coefficient de Poisson
ξ	coordonnée selon l'axe x du centre d'inertie d'une aire plane
ρ	masse volumique
ρ	rayon de courbure
σ	contrainte normale
σ_{BC}	résistance à la compression du matériau
σ_B	résistance à la traction du matériau
σ_c	contrainte critique
σ_e	limite apparente d'élasticité (limite d'écoulement) du matériau
σ_{ec}	limite apparente d'élasticité du matériau en compression
σ_{et}	limite apparente d'élasticité du matériau en traction
σ_g	contrainte de comparaison (contrainte équivalente)
σ_p	limite de proportionnalité du matériau
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	contraintes normales selon les axes x, y et z

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ contraintes principales

$\sigma_\varphi, \tau_\varphi$ contraintes normale et tangentielle dans une section oblique d'angle φ

τ contrainte tangentielle

τ_e limite apparente d'élasticité du matériau en torsion

τ_x, τ_y contraintes tangentielles selon les axes x et y sur une face donnée

τ_{xy}, τ_{xz} contraintes tangentielles selon les axes y et z sur une face de normale x

τ_{yx}, τ_{yz} contraintes tangentielles selon les axes x et z sur une face de normale y

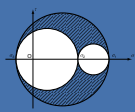
τ_{zx}, τ_{zy} contraintes tangentielles selon les axes x et y sur une face de normale z

φ angle associé aux coordonnées polaires

φ angle d'inclinaison d'une section oblique

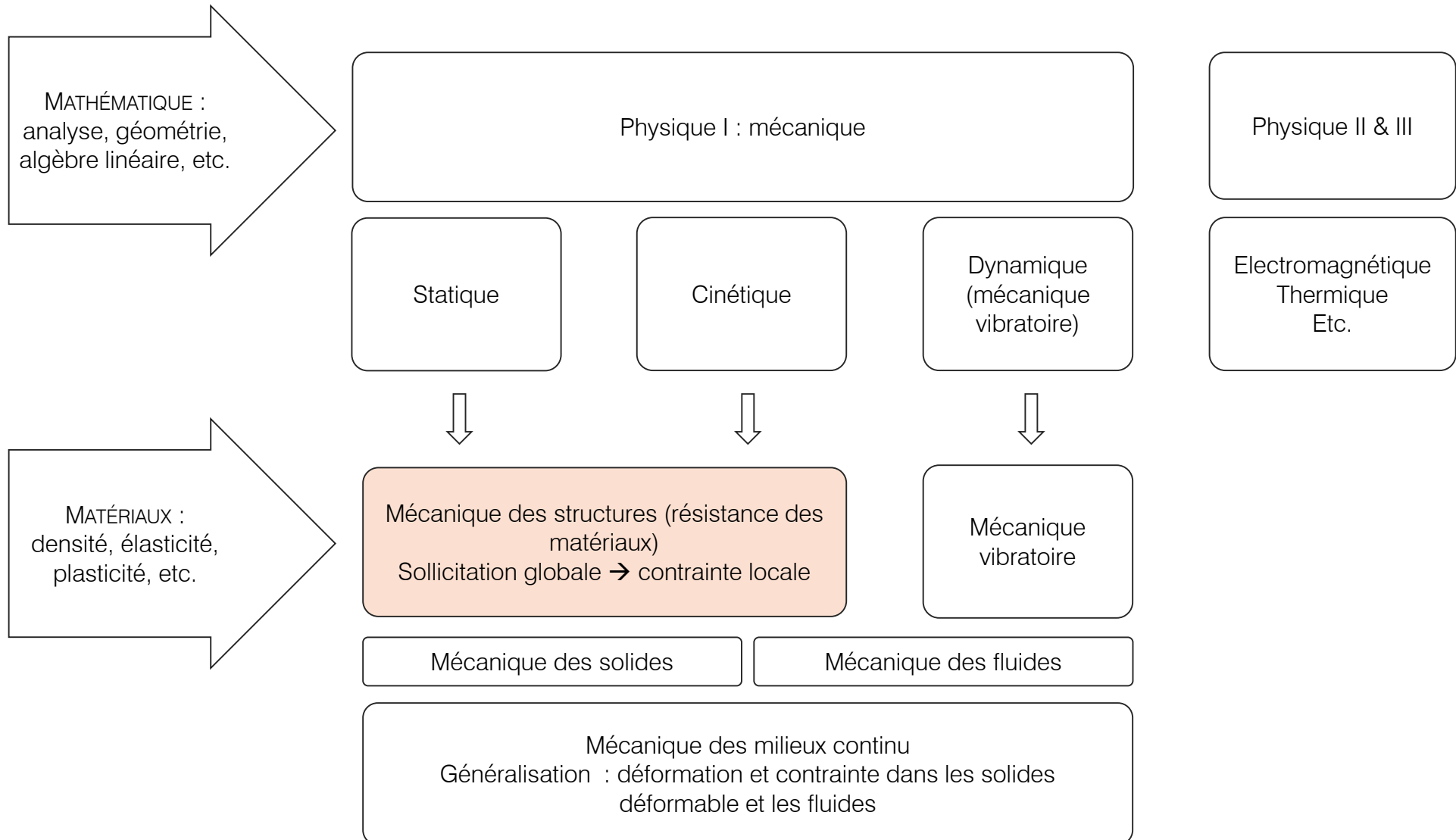
φ angle de rotation d'une poutre en flexion

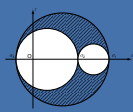
φ déformation angulaire d'une barre en torsion (angle de torsion)



Chapitre 0 : Introduction

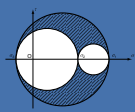
Contexte du cours de le cursus





@Wiki :

- La **statique**, ou mécanique statique, est la branche de la physique qui étudie les systèmes mécaniques au repos
- En physique, la **cinématique** (du grec mouvement) est l'étude des mouvements indépendamment des causes qui les produisent
- La **dynamique** (du grec ancien puissant, efficace) est une discipline de la mécanique classique qui étudie les corps en mouvement sous l'influence des actions mécaniques qui leur sont appliquées. Elle combine la statique qui étudie l'équilibre des corps au repos, et la cinématique qui étudie le mouvement.



@Wiki :

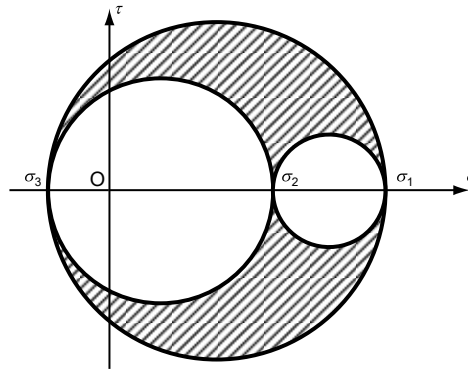
- La résistance des matériaux (ou *mécanique des structures*) est une discipline particulière de la mécanique des milieux continus permettant le calcul des contraintes et déformations dans les structures des différents matériaux. Elle permet de ramener l'étude du comportement global d'une structure (relation entre sollicitations — forces ou moments — et déplacements) à celle du comportement local des matériaux la composant.
- La *mécanique des solides*, est la branche de la mécanique des milieux continus qui étudie le comportement des matériaux solides, en particulier leur mouvement et leur déformation sous l'action de forces, de changements de température, de changements de phase et d'autres agents externes ou internes (parfois associée uniquement à la cinématique des corps rigides indéformables)
- La *mécanique des milieux continus* est le domaine de la mécanique qui s'intéresse à la déformation des solides et à l'écoulement des fluides



- Elasticity:



Mécanique des structures

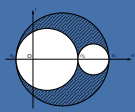


Chapitre 0: Introduction

Dr. Alain Prenleloup
SGM BA3 2024-2025

EPFL





Chapitre 0 : Introduction

Démarche et applications

(A) Introduction des notions générales et des hypothèses

Mathématique

(B) Identification des efforts non-nuls

Statique

(C) Expression des contraintes normale et tangentiel résultantes

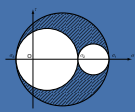
Mécanique des solides

(D) Analyse de l'état de contrainte

Compétence d'ingénieur

(E) Énergie de déformation (force & déplacement)

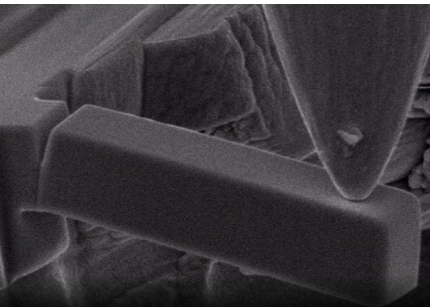




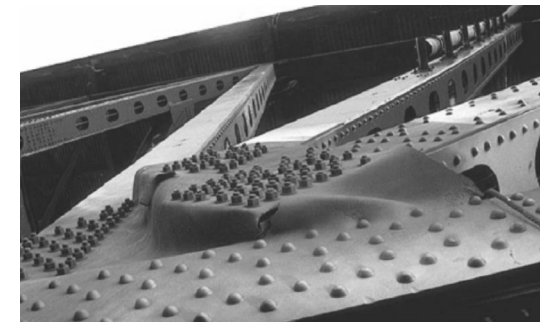
Chapitre 0 : Introduction

Démarche et applications

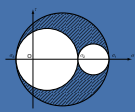
- 1) Définir le **modèle** par un **dessin** et un système de coordonnées (**hypothèses**)
- 2) Identifier tous les **efforts** (**forces et moments**) externes et internes
- 3) Identifier les inconnues (et l'**hyperstatisme**)
- 4) Appliquer les **équations d'équilibre** ($\Sigma \mathbf{F} = 0$ et $\Sigma \mathbf{M} = 0$)
- 5) Identifier les **mécanismes physique** et poser les **équations d'élasticité** adéquats
- 6) Calculer les contraintes (σ et τ) et définir un critère d'intégrité (ex : $\sigma_{vonMises}$)
- 7) Interpréter les résultats (**réflexion d'ingénieur**)



Micro-Cantilever Fracture Testing

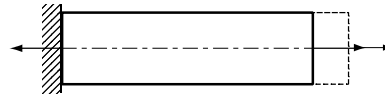


Bridge Collapse, Mississippi River 2007

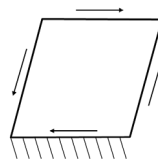


5) Identifier les mécanismes physique et poser les **équations d'élasticité** adéquats

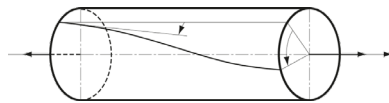
- Traction-compression



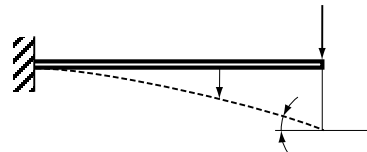
- Cisaillement



- Torsion



- Flexion



- Flambage



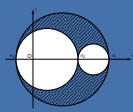
6) Calculer les contraintes (σ et τ) et définir un critère d'intégrité (ex : $\sigma_{vonMises}$)

- Loi d'élasticité

$$\sigma = E \varepsilon$$

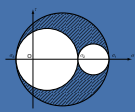
- Critère

$$n = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma_{caractéristique}}$$



Objectifs

- **Objectif 1** : Appliquer vos connaissances de math-physique pour dimensionner des problèmes «simple» bi- ou tri-dimensionnelle
- **Objectif 2** : Déterminer les contraintes et déformations dans les structures en fonction des charges
- **Objectif 3** : Comprendre les mécanisme physique et les hypothèses mathématiques qui permettent de déterminer un critère d'intégrité (coefficient de sécurité)
- **Coefficient de sécurité**
 - pièces de structure en acier : 1.1 à 1.5
 - aviation : $n = 1.5$
 - domaine du génie civil : $n = 1.5$
 - appareils de levage industriels par chaîne/câble/sangle : $n = 4/5/7$
 - ascenseur : $n = 10$
 - mécanismes : $n = 2.5$ à 10
 - choc ou sollicitation mal connue : $n = 10 - 15$
- Identifier les incertitudes : hypothèse, propriété des matériaux, singularités, etc.
- Intérêts et limites de la simulation numérique vs mécanique des structures



Mécanique des structures

$$P = 30 \text{ kN}$$

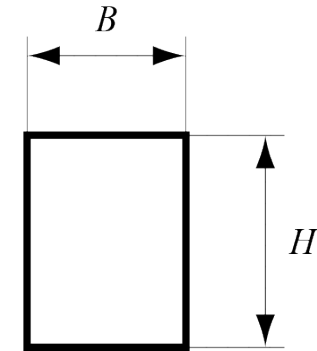
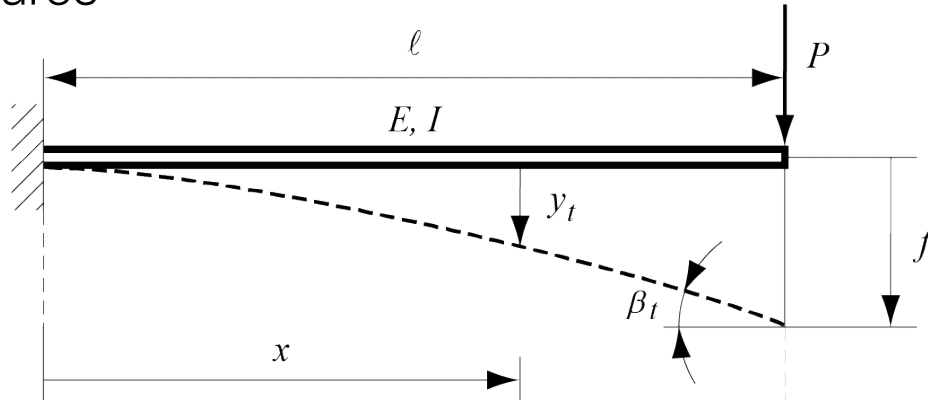
$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$G = 80 \text{ GPa}$$

$$B = 5 \text{ cm}$$

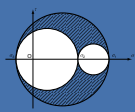
$$H = 10 \text{ cm}$$

$$\ell = 1 \text{ m}$$



$$I = \frac{BH^3}{12}$$

- $f_t = \frac{P \ell^3}{3EI} + \eta \frac{P\ell}{GF} = 11.4 + 0.09 = 11.49 \text{ mm}$
- $\sigma_{max} = \sigma(x = 0, y = H/2) = \frac{yM(x)}{I} = \frac{6P\ell}{BH^2} = 360 \text{ MPa}$



Méthode des éléments finis

$$P = 30 \text{ kN}$$

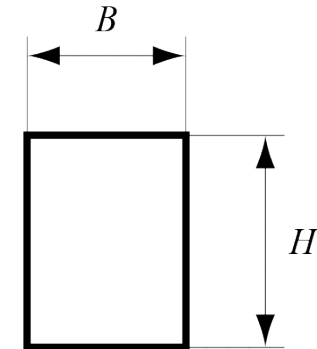
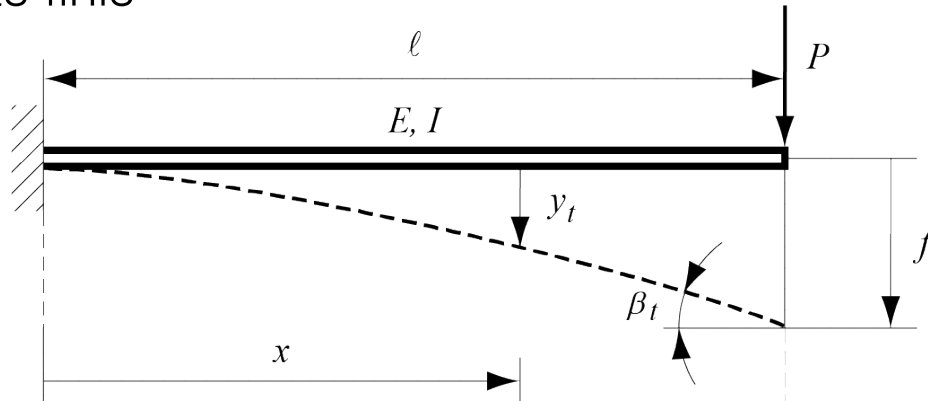
$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$G = 80 \text{ GPa}$$

$$B = 5 \text{ cm}$$

$$H = 10 \text{ cm}$$

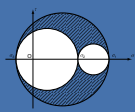
$$\ell = 1 \text{ m}$$



$$I = \frac{BH^3}{12}$$

Question importantes

- Quelles sont les hypothèses considérés ? Conditions aux limites, linéarité, etc.
- Qu'elle est la physique représentée : mécanique, thermique, dynamique, etc.
- Que cherche-t-on à déterminer et avec quelles approximations?



Chapitre 0 : Introduction

Exemple : poutre en flexion

Méthode des éléments finis

$$P = 30 \text{ kN}$$

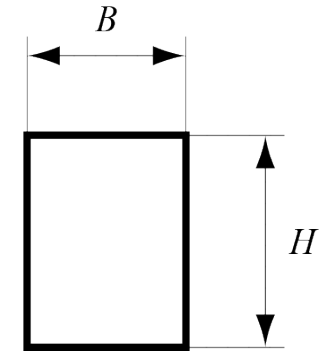
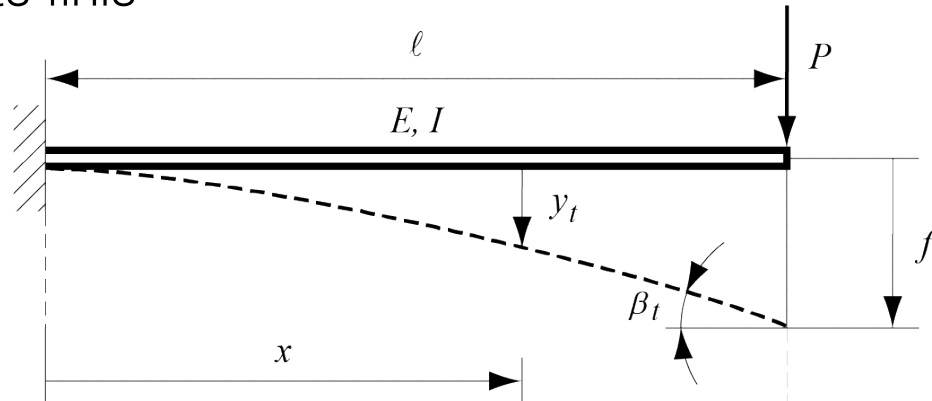
$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$G = 80 \text{ GPa}$$

$$B = 5 \text{ cm}$$

$$H = 10 \text{ cm}$$

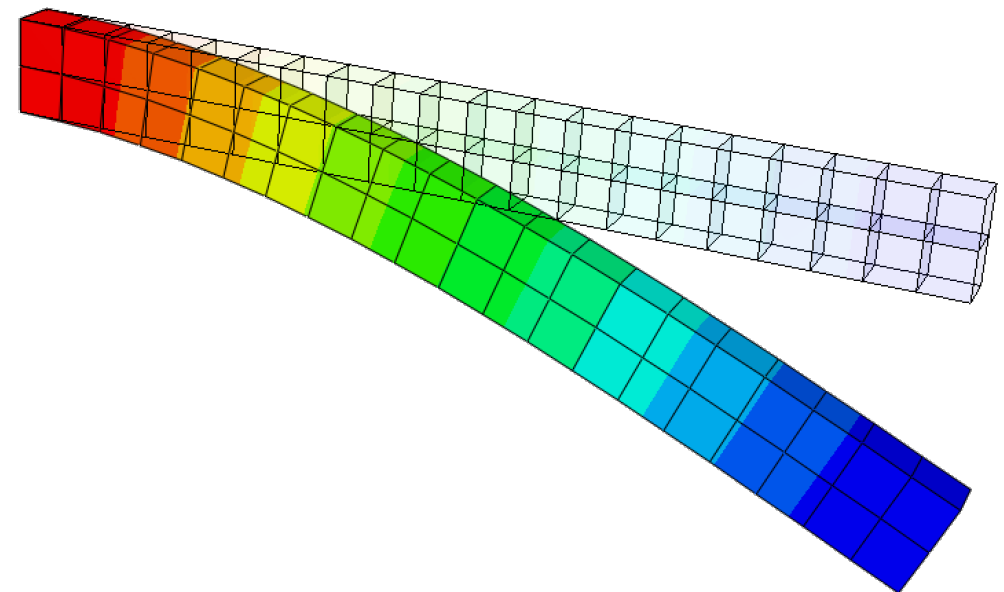
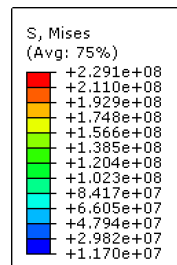
$$\ell = 1 \text{ m}$$

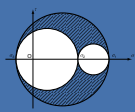


$$I = \frac{BH^3}{12}$$

- $f_t = 15.26 \neq 11.49 \text{ mm}$

- $\sigma_{max} = 229 \neq 360 \text{ MPa}$





Chapitre 0 : Introduction

Exemple : poutre en flexion

Méthode des éléments finis

$$P = 30 \text{ kN}$$

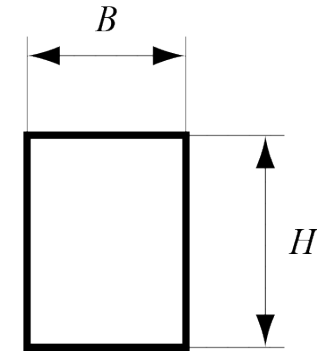
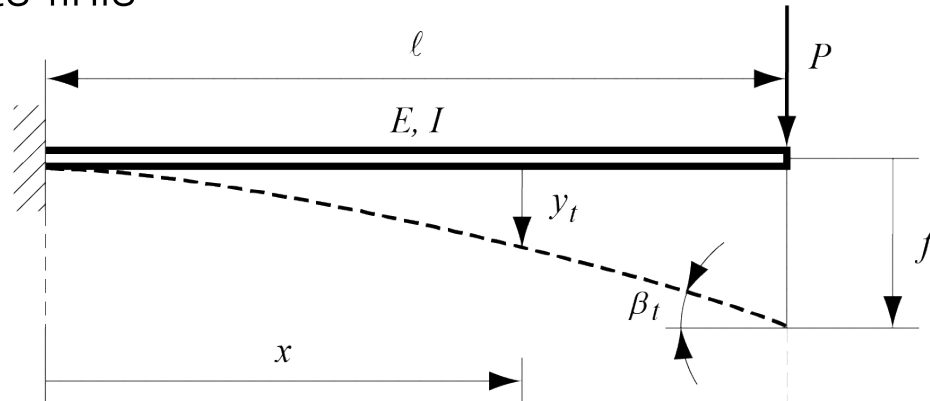
$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$G = 80 \text{ GPa}$$

$$B = 5 \text{ cm}$$

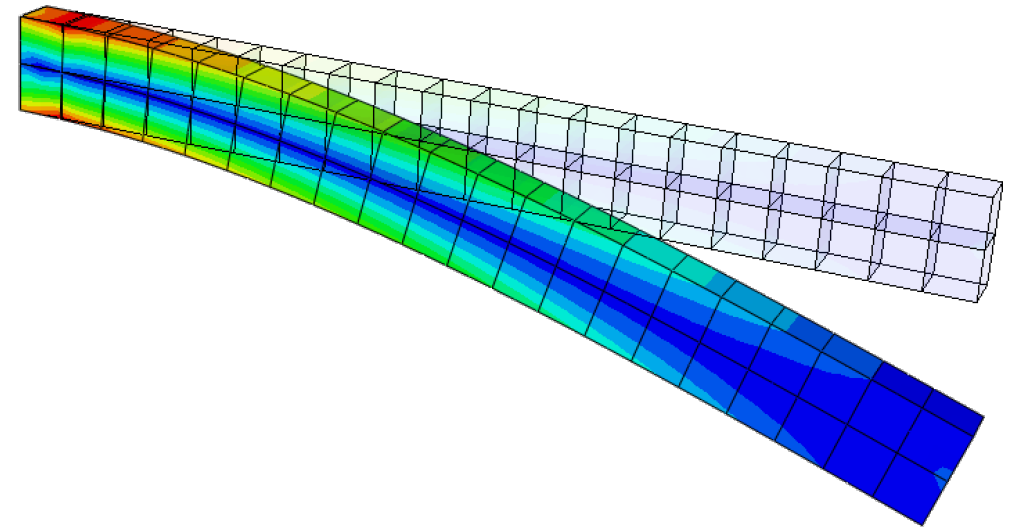
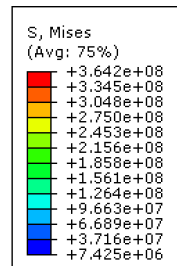
$$H = 10 \text{ cm}$$

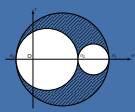
$$\ell = 1 \text{ m}$$



$$I = \frac{BH^3}{12}$$

- $f_t = 11.5 \cong 11.49 \text{ mm}$
- $\sigma_{max} = 364 \cong 360 \text{ MPa}$





Mécanique des structures

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$\ell = 30 \text{ mm}$$

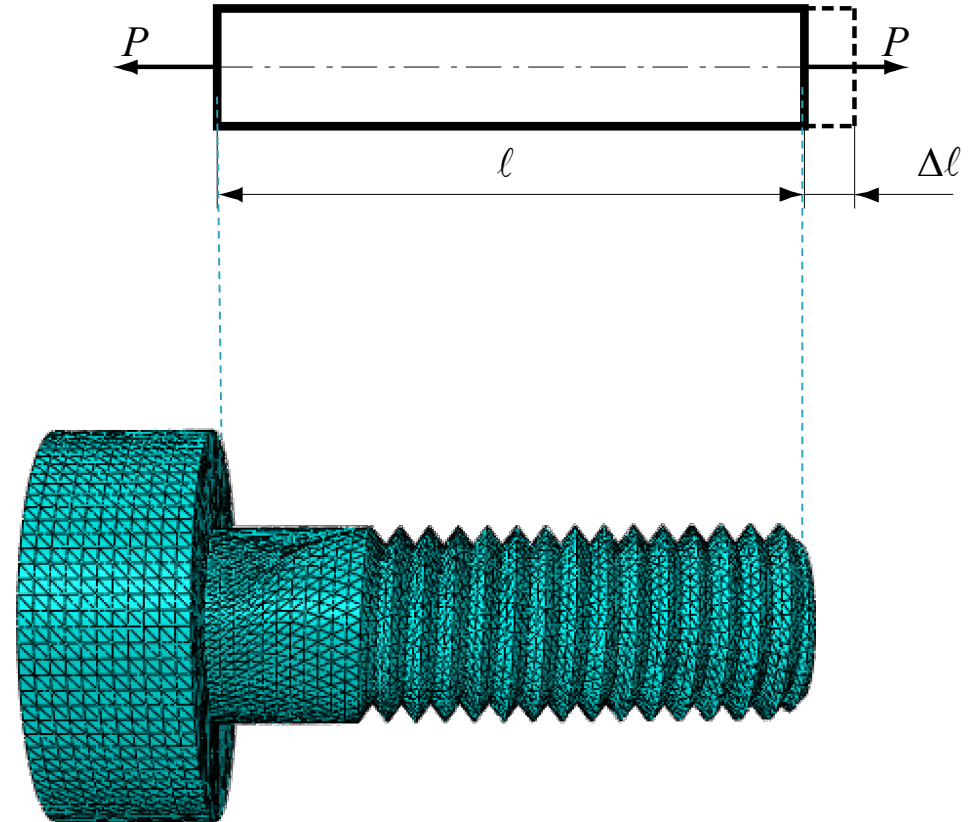
$$P = 55 \text{ kN}$$

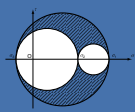
$$\varnothing = \text{M10}$$

$$\sigma_{\text{classe 8.8}} = 1034 \text{ MPa}$$

- $\Delta \ell = \frac{P \ell}{E F} = 0.1 \text{ mm}$

- $\sigma = \frac{P}{F} = \frac{\Delta \ell}{\ell} E = \varepsilon E = 700 \text{ MPa}$





Chapitre 0 : Introduction

Exemple : charge maximale d'une vis

Mécanique des structures

$$E = 210 \text{ GPa}$$

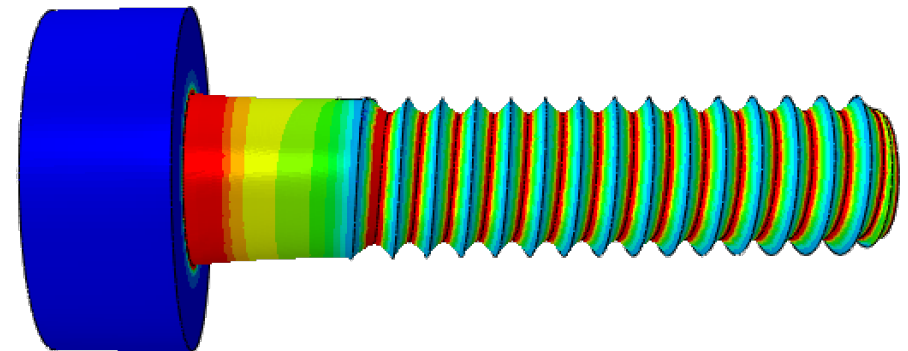
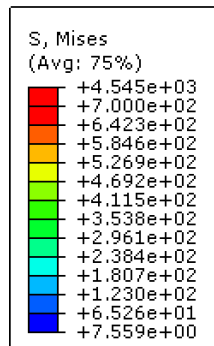
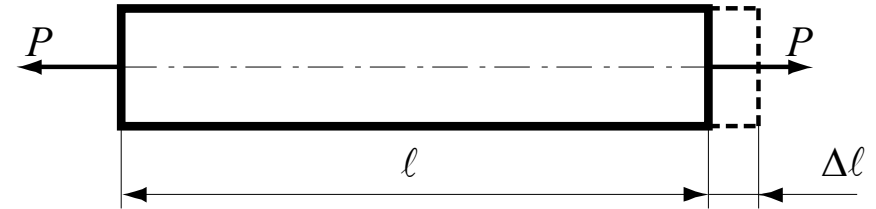
$$\ell = 30 \text{ mm}$$

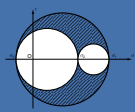
$$P = 55 \text{ kN}$$

$$\varnothing = \text{M10}$$

$$\sigma_{\text{classe 8.8}} = 1034 \text{ MPa}$$

- $\Delta\ell = \frac{P\ell}{EF} = 0.1 \text{ mm}$
- $\sigma_{\text{von Mises}} = 4545 \neq 700 \text{ MPa}$

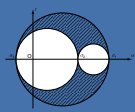




Pourquoi de la mécanique des structures ?

- A. Quelles sont les contraintes principales dans les parties de l'encrage
- B. Estimer les contraintes maximum sur l'une des zones d'encrage



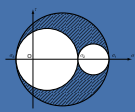


Chapitre 0 : Introduction

Pourquoi de la mécanique des structures ?

Objectif : Quel est l'intérêt de ce profil de poutre?



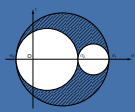


Chapitre 0 : Introduction

Pourquoi de la mécanique des structures ?

- A. Quelles sont les contraintes principales dans la poutre
- B. Quelles zones subissent une contrainte maximal

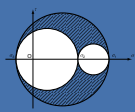




Pourquoi de la mécanique des structures ?

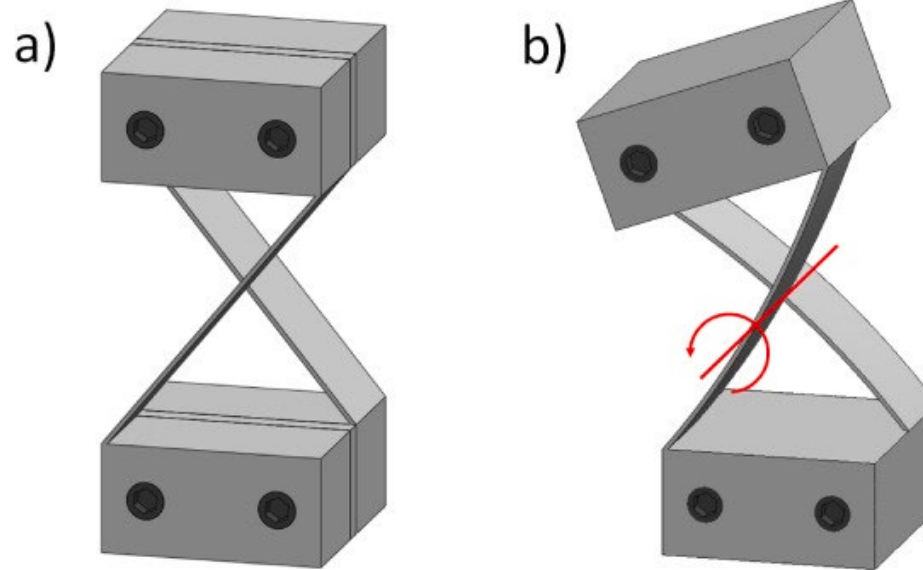
- A. Quel couple maximum peut être transmis par cette turbine (estimer la puissance max)?
- B. Tension dans les vis de couplage pour garantir une transmission par frottement

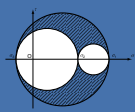




Pourquoi de la mécanique des structures ?

Déterminer la rigidité d'un guidage flexible





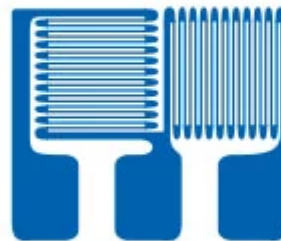
Pourquoi de la mécanique des structures ?

- A. Comment fonctionne une jauge de déformation
- B. Où positionner et comment orienter une jauge extensométrique

Linear strain gauges



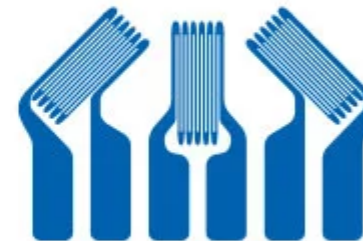
T-rosettes strain gauges

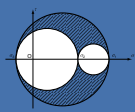


Rosettes strain gauges



V-shaped strain gauges



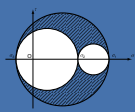


Chapitre 0 : Introduction

Pourquoi de la mécanique des structures ?

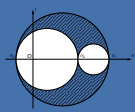
Quel objet est adapté pour fermé hermétiquement une bouteille et pourquoi?





Comment travaille les câbles ?

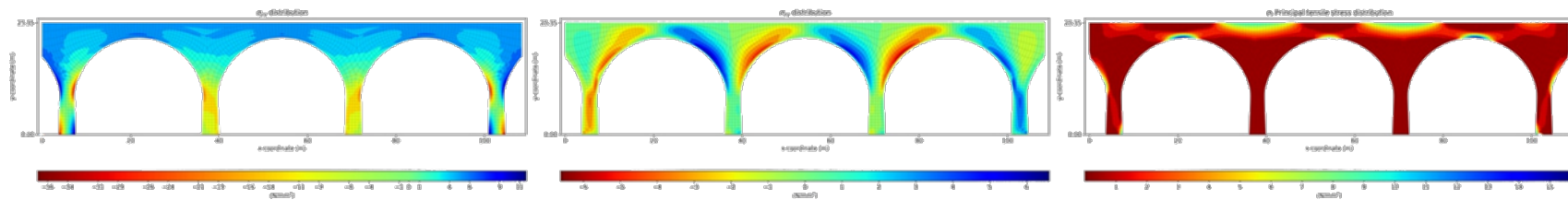
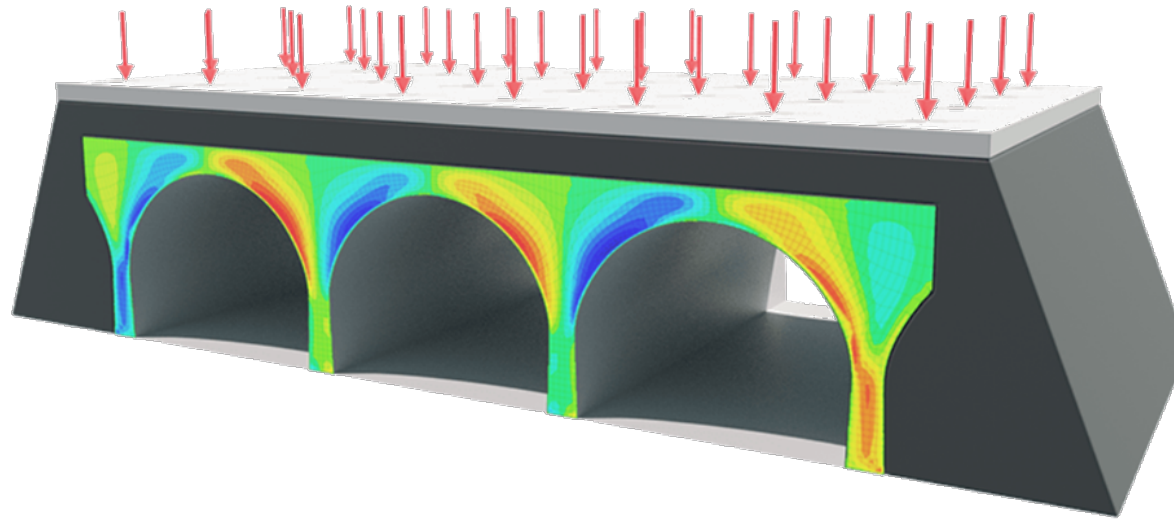


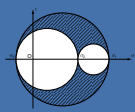


Chapitre 0 : Introduction

Pourquoi de la mécanique des structures ?

Quelle interprétation faut-il faire des champs de contrainte simulés?

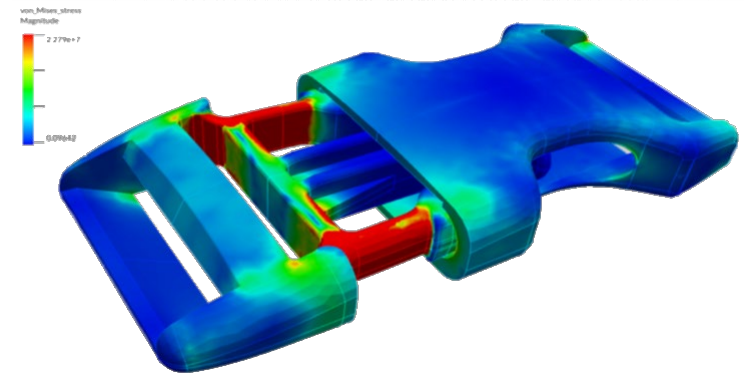
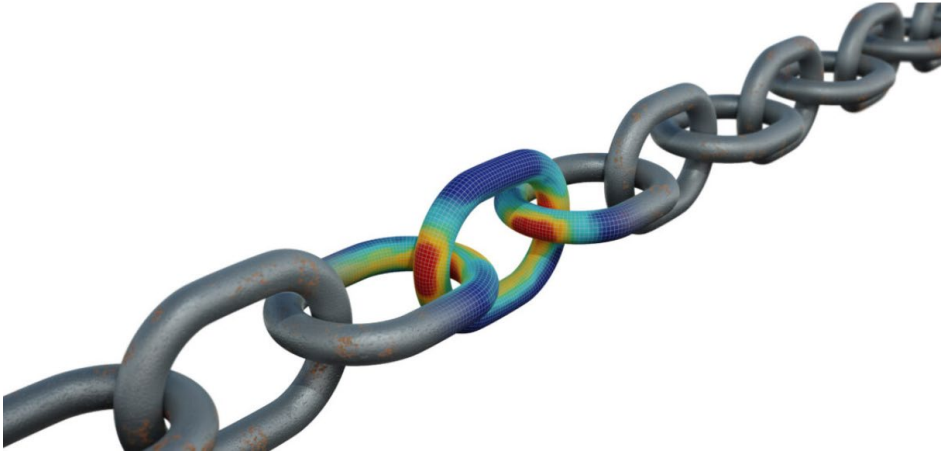


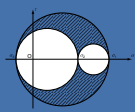


Chapitre 0 : Introduction

Pourquoi de la mécanique des structures ?

Quelle interprétation faut-il faire des champs de contrainte simulés?

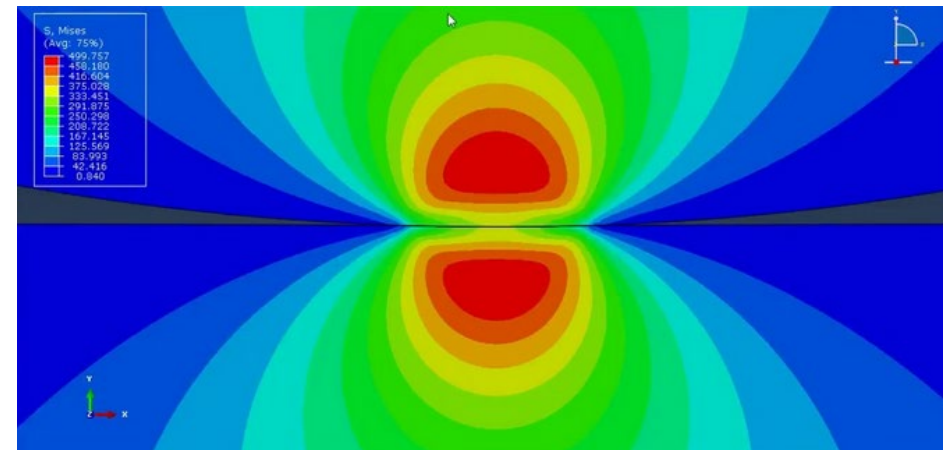
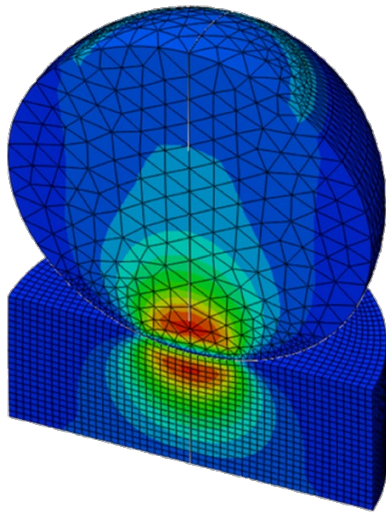


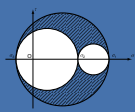


Chapitre 0 : Introduction

Pourquoi de la mécanique des structures ?

Quelle interprétation faut-il faire des champs de contrainte simulés?

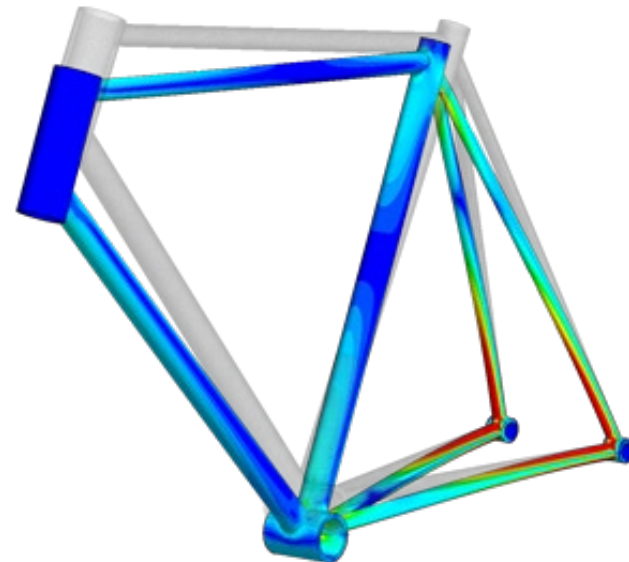
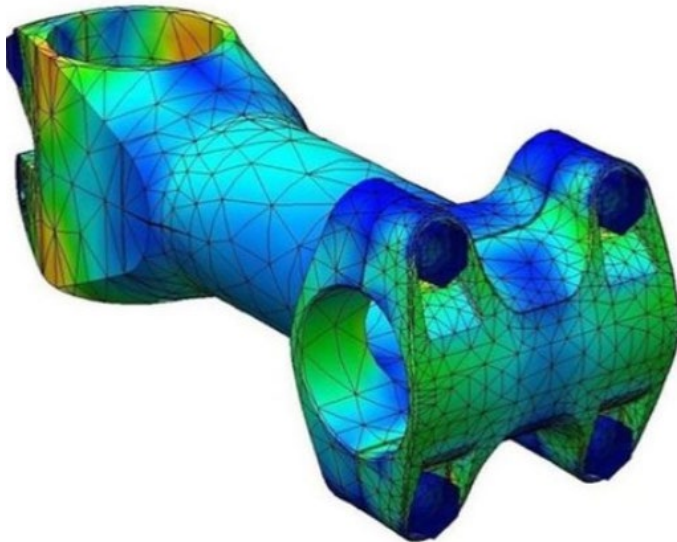


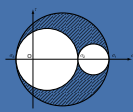


Chapitre 0 : Introduction

Pourquoi de la mécanique des structures ?

Quelle interprétation faut-il faire des champs de contrainte et déformation simulés ?

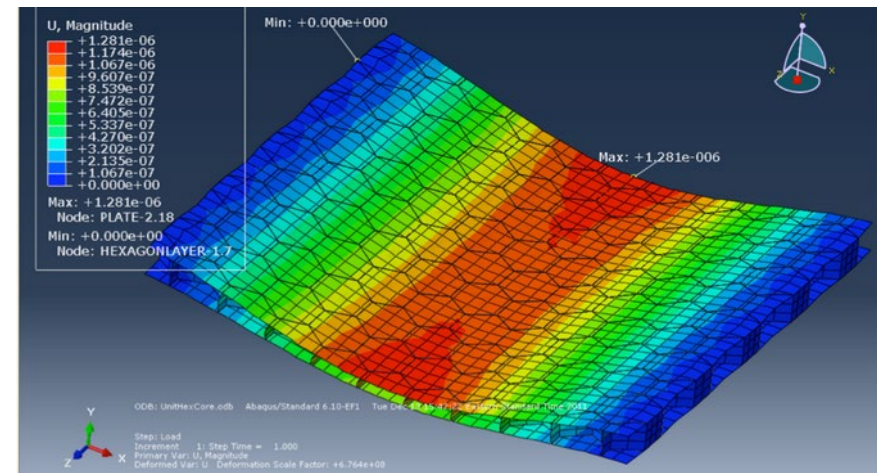
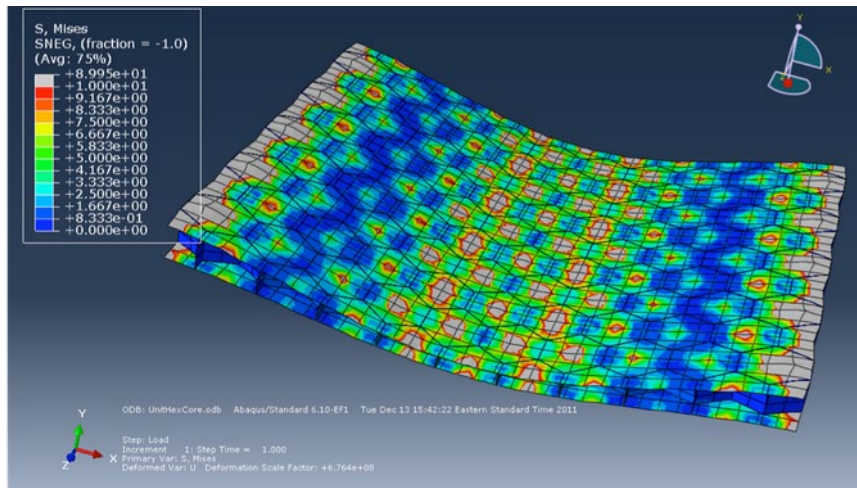




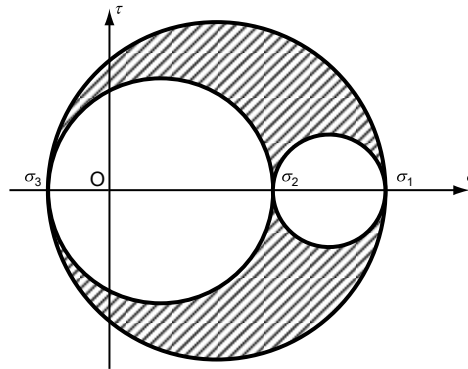
Chapitre 0 : Introduction

Pourquoi de la mécanique des structures ?

Quelle interprétation faut-il faire des champs de contrainte et déformation simulés?



Mécanique des structures

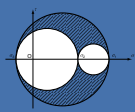


Chapitre 0: Introduction

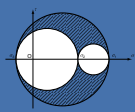
Dr. Alain Prenleloup
SGM BA3 2024-2025

EPFL

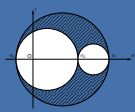




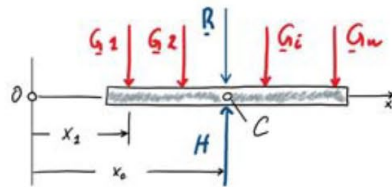
- Objectif : analyse et conception de système mécanique
- Corollaire : déterminer la rigidité et/ou la résistance nécessaire d'un système mécanique soumis à des charges prédéfinies
- Classe et comportement des matériaux (principalement le comportement élastique)
- Racine des notions de statique
 - Cinématique du point
 - Accélération nulle
 - Équilibre des forces et moments
 - Loi d'action et de réaction
 - Loi de Hooke 1d
 - Lien contrainte – déformation
 - Structure élémentaire : bars, câble, poutre
- Type de rupture
 - Flambage (rupture dans le domaine élastique)
 - Rupture mécanique ou plastification (endommagement hors du domaine non-élastique)



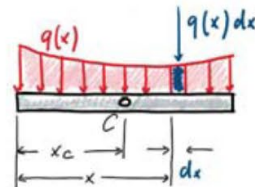
- Tenseur de force définit par un point d'application, une amplitude et une direction
- Le moment de la force au point A est défini par rapport à un point O arbitraire
 - $\vec{M}_O = \vec{F} \wedge \vec{OA}$
- Équations d'équilibre des forces et des moments
 - $\sum F_i = 0$
 - $\sum M_i = \sum F_i \wedge r_i = 0$



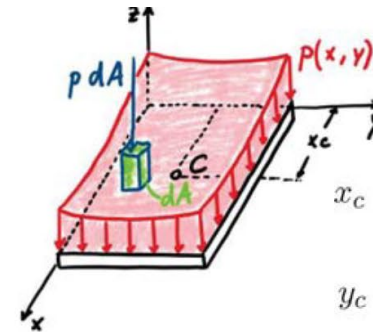
- Centre de force ponctuelle, linéique distribuée, surfacique



$$x_c = \frac{\sum x_i G_i}{\sum G_i}$$



$$x_c = \frac{\int x q(x) dx}{\int q(x) dx}$$

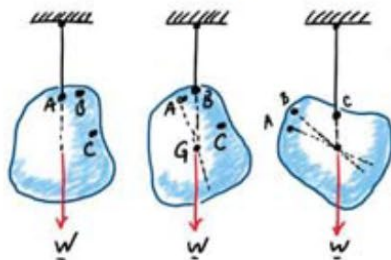


$$x_c = \frac{\int_A x \cdot p(x, y) \cdot dA}{\int_A p(x, y) \cdot dA}$$

$$y_c = \frac{\int_A y \cdot p(x, y) \cdot dA}{\int_A p(x, y) \cdot dA}$$

- Centre de gravité

Center of gravity:



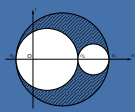
$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\int x dW}{W} \\ &= \frac{\int x dm}{m} \\ &= \frac{\int x \rho dV}{\int \rho dV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{\int y dW}{W} \\ &= \frac{\int y dm}{m} \\ &= \frac{\int y \rho dV}{\int \rho dV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{z} &= \frac{\int z dW}{W} \\ &= \frac{\int z dm}{m} \\ &= \frac{\int z \rho dV}{\int \rho dV} \end{aligned}$$

$$dW = g \cdot dm$$

$$dm = \rho \cdot dV$$

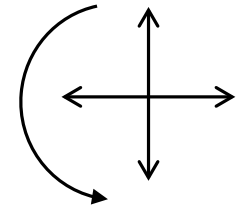


Liaisons méca. ext. planes

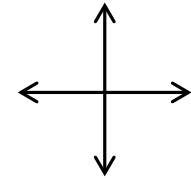
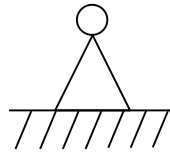
Schéma

Efforts de réactions

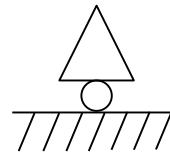
Encastrement



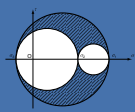
Articulation



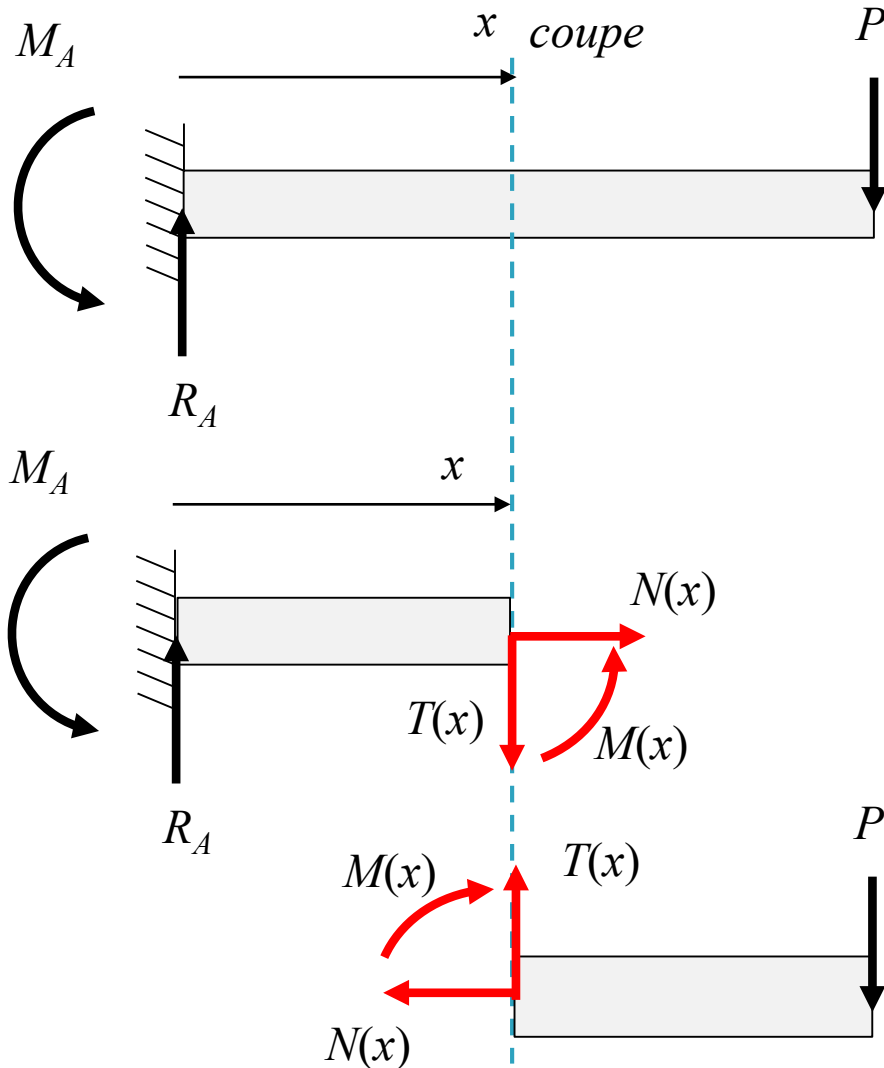
Appui simple



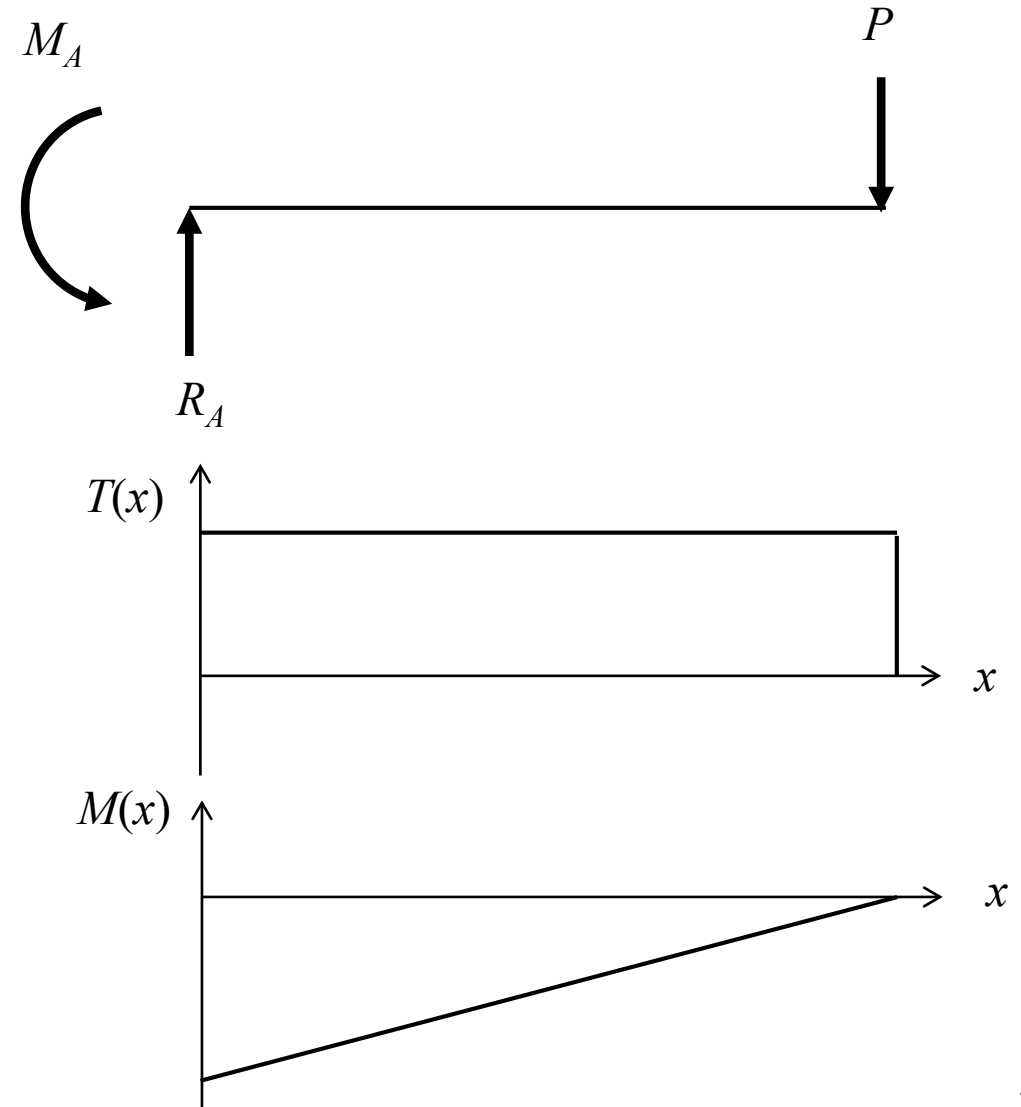
Autres liaisons mécaniques : encastrement, pivot, glissière, pivot glissant, hélicoïde, rotule appui-plan, sphère cylindrique, cylindre-plan, sphère-plan, etc.

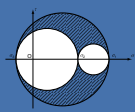


Efforts intérieurs dans une poutre



Diagrammes des efforts intérieurs





Problème 0.1

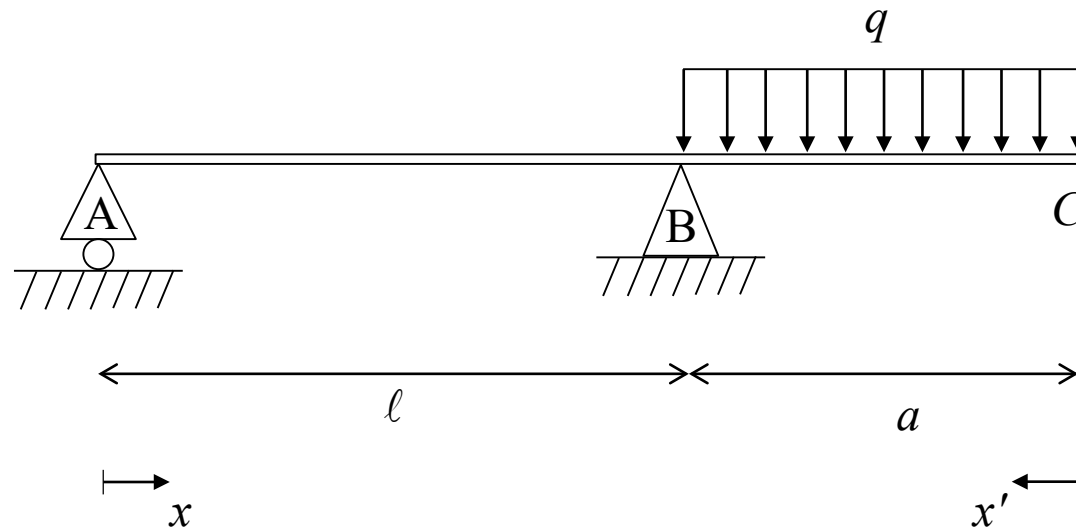
Calculer les réactions aux appuis de la poutre schématisée ci-contre, puis dessiner les diagrammes T et M des efforts intérieurs.

Application :

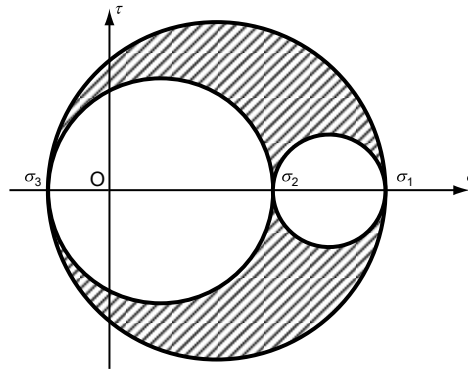
$$a = 1 \text{ m}$$

$$\ell = 2 \text{ m}$$

$$q = 5 \text{ kN / m}$$



Mécanique des structures

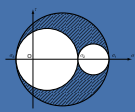


Chapitre 0: Introduction

Dr. Alain Prenleloup
SGM BA3 2024-2025

EPFL





Problème 0.1

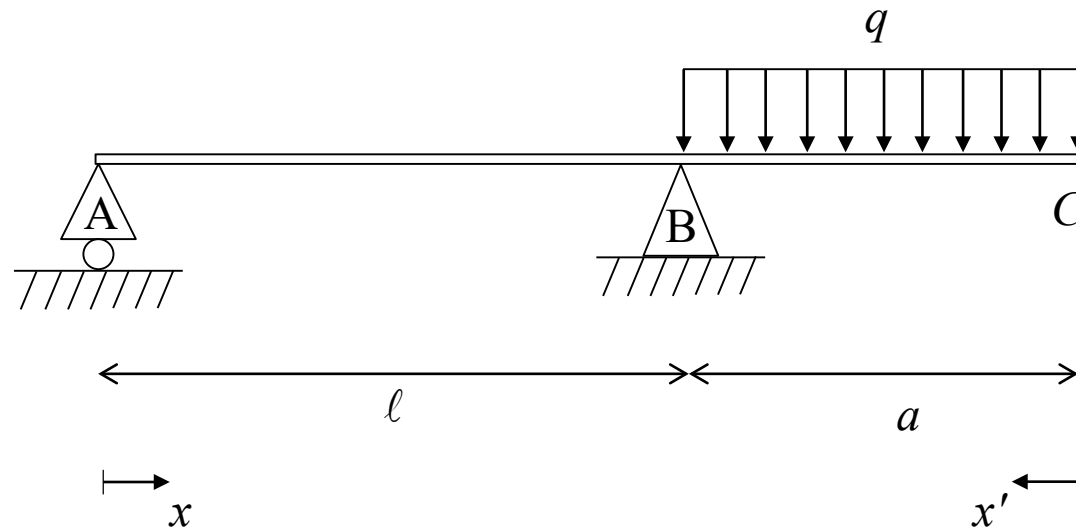
Calculer les réactions aux appuis de la poutre schématisée ci-contre, puis dessiner les diagrammes T et M des efforts intérieurs.

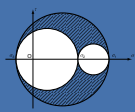
Application :

$$a = 1 \text{ m}$$

$$\ell = 2 \text{ m}$$

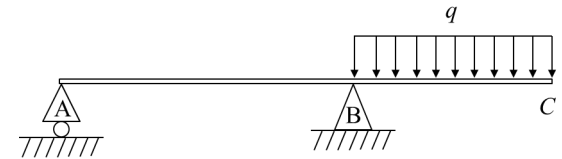
$$q = 5 \text{ kN / m}$$

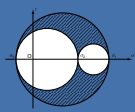




Chapitre 0 : Introduction

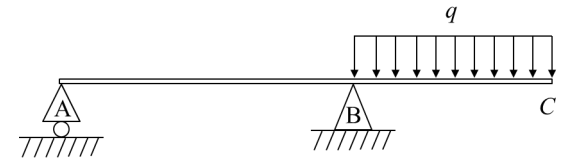
Problème 0.1

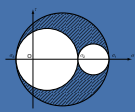




Chapitre 0 : Introduction

Problème 0.1





Chapitre 0 : Introduction

Problème 0.1

