

■ Autrice des dias (2023)
Prof. Katrin Beyer

■ Earthquake
Engineering and
Structural Dynamics
Laboratory

■ Dias supplémentaires
Prof. E. Denarié (2025)

■ Laboratoire de
comportement et
conception des
structures en béton

Actions sollicitant les structures

Statique

Prof. E. Denarié



A la fin de ce cours, vous connaîtrez :

- Les principaux types d'actions agissant sur les structures

NB : cette partie du cours est une introduction générale à ce qui sera présenté en détail dans les cours suivants (BA).

➔ Elle ne fait pas partie de la matière à connaître pour les examens du cours de statique.

1. Principaux types d'actions agissant sur les structures
 - Actions permanentes
 - Actions variables
 - Forces imposées
 - Déplacements imposés

- *ACTION : actions mécaniques (charges, forces), autres actions physiques (température, humidité), actions chimiques (sels, acides, solutions alcalines, composés organiques) et biologiques (bactéries, insectes, champignons, algues) agissant sur la structure porteuse, qui résultent de l'exécution et de l'utilisation de celle-ci ou sont dues aux influences de l'environnement.*

Selon la norme SIA 260

Principaux types d'actions

- Actions permanentes (poids propre par exemple)
- Actions variables (poussée de l'eau - barrages, personnes, trafic, séismes, neige, etc.)
- Actions climatiques : neige, vent, variations T et HR
- Charges gravitationnelles
- Charge de trafic (routier, ferroviaire, aéronefs)
- Charges d'exploitation - utiles (bâtiments par exemple)
- Pressions (eau, vent par exemple)
- Tassements du sol de fondation
- Action du terrain (réactions sur les fondations, poussée des terres, sous-pressions)

- Actions permanentes et variables



https://fr.123rf.com/photo_21710294_la-tour-beekman-%C3%A9galement-connu-sous-le-nom-8-sapins-ou-%C3%A0-new-york-par-gehry.html



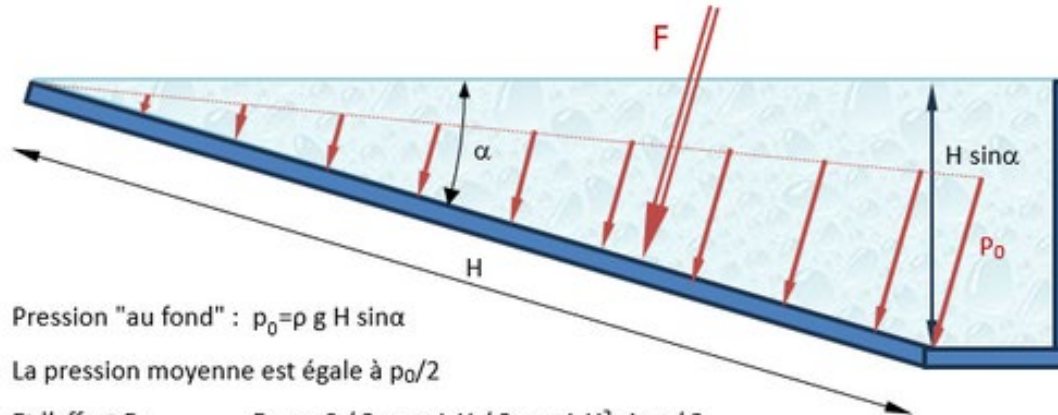
<https://www.geograph.ie/photo/5201325>



https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Diga_Place_Moulin.JPG

■ Poussée de l'eau

L = épaisseur perpendiculairement à la figure
 ρ (eau) = 1000 kg/m^3



Pression "au fond" : $p_0 = \rho g H \sin \alpha$

La pression moyenne est égale à $p_0/2$

Et l'effort F : $F = p_0 S / 2 = p_0 L H / 2 = \rho g L H^2 \sin \alpha / 2$

Si $L = H = 1 \text{ m}$ et $\alpha = 30^\circ$ **$F = 2452.5 \text{ N}$**

<https://forum.mycad.visiativ.com/t/pression-hydrostatique-sur-plan-incline/111075/2>

- Suisse : Norme SIA 261

s i a

SIA 261:2020 Construction



505 261

Remplace SIA 261:2014

Einwirkungen auf Tragwerke
Azioni sulle strutture portanti
Actions on structures

Actions sur les structures porteuses

■ Charges de neige

- 5.2.2 La valeur caractéristique de la charge de neige sur les toitures, rapportée à la surface horizontale recouverte, est définie par:

$$q_k = \mu_i \cdot C_e \cdot C_T \cdot s_k \quad (9)$$

- 5.2.3 Les coefficients de forme de toiture μ_i tiennent compte de la différence entre la charge de neige sur les toitures et celle sur un terrain horizontal. Ils sont à déterminer selon les figures 2 à 5.

- 5.2.4 Selon l'exposition au vent de l'ouvrage, le coefficient d'exposition C_e prend les valeurs suivantes:

- exposition au vent normale $C_e = 1,0$
- endroit fortement exposé au vent $C_e = 0,8$
- endroit protégé du vent $C_e = 1,2$.

- 5.2.5 Le coefficient thermique C_T est généralement égal à 1,0. Il est possible de choisir une valeur plus petite si le processus de la fonte des neiges est accéléré par une forte transmission de chaleur à la surface du toit. L'influence d'une défaillance des installations techniques sur la transmission de chaleur admise devra être examinée au préalable, par exemple dans le cas de toitures vitrées recouvrant des locaux chauffés.

- 5.2.6 La valeur caractéristique de la charge de neige sur un terrain horizontal est calculée au moyen de l'équation suivante:

$$s_k = \left[1 + \left(\frac{h_0}{350} \right)^2 \right] \cdot 0,4 \text{ kN/m}^2 \geq 0,9 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

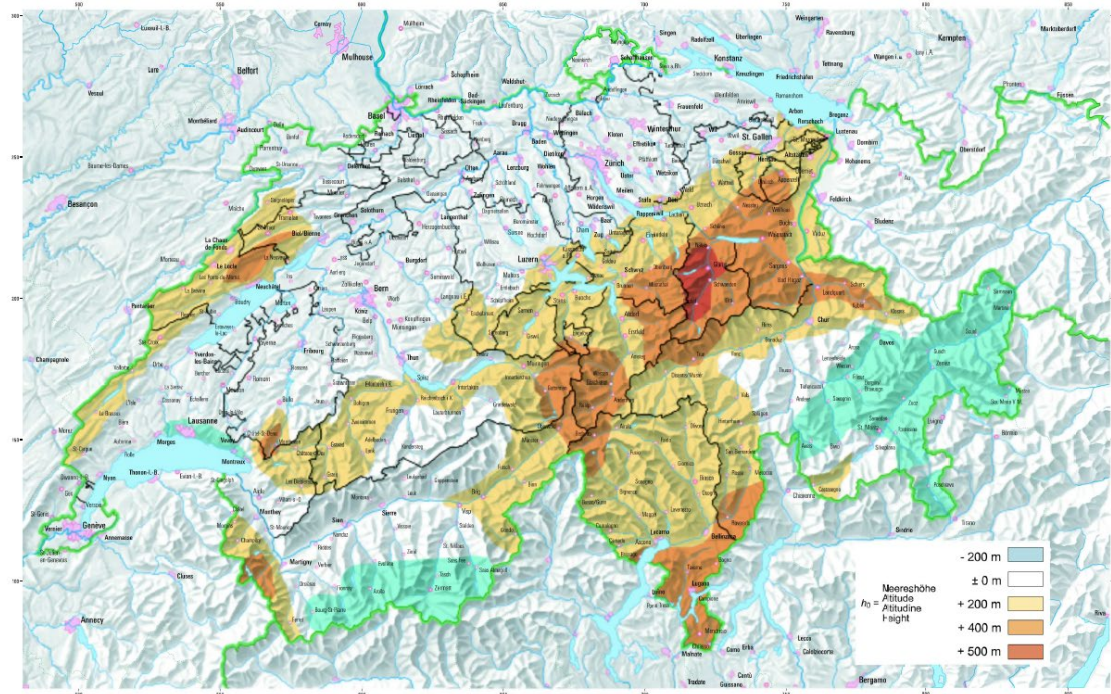
L'altitude de référence h_0 (en m) peut être déterminée selon l'annexe D. La correction concernant l'altitude tient compte du climat régional.

➔ On vérifie l'effet de différentes dispositions des charge sur les toitures

Principaux types d'actions (Norme SIA 261)

■ Charges de neige

Annexe D (normative) Altitude de référence pour les charges de neige



Anhang
Annexe
Allegato

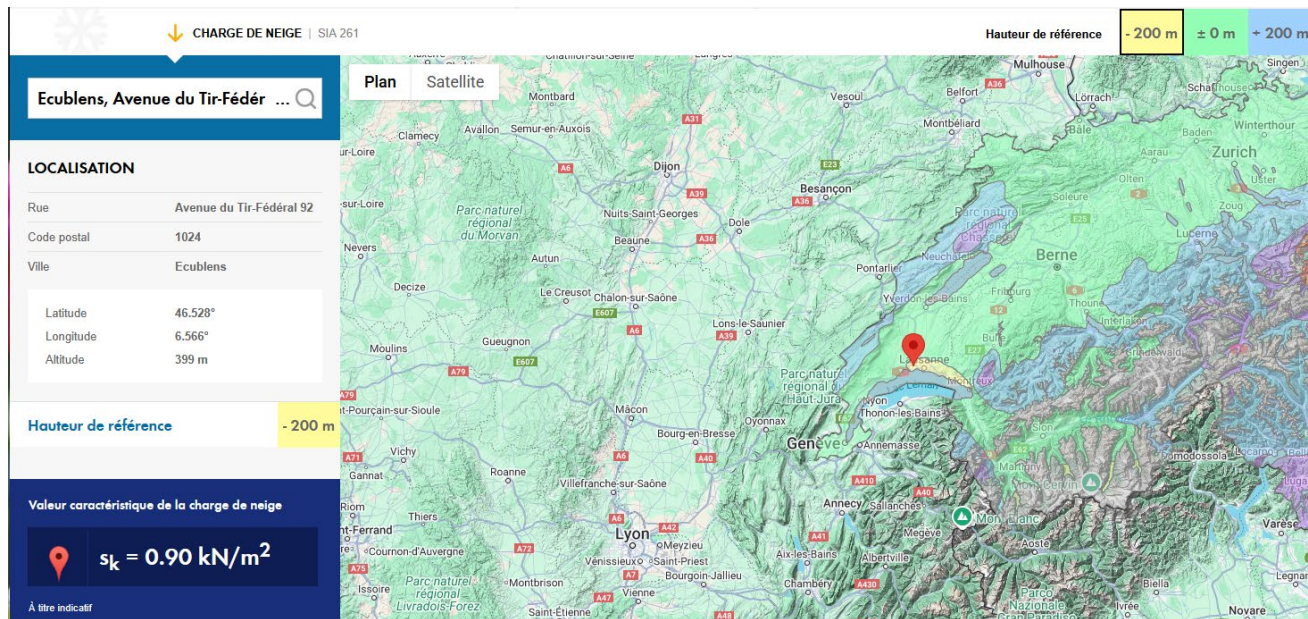
Bezugshöhe h_0
Altitude de référence h_0
Altitudine di riferimento h_0

(nicht anwendbar auf Bauwerke über 2000 m Meereshöhe)
(pas applicable pour les constructions situées au-dessus de 2000 m d'altitude)
(non applicabile a costruzioni ubicate sopra 2000 m sul mare)

Scale: 0 10 20 40 km

Principaux types d'actions (Norme SIA 261)

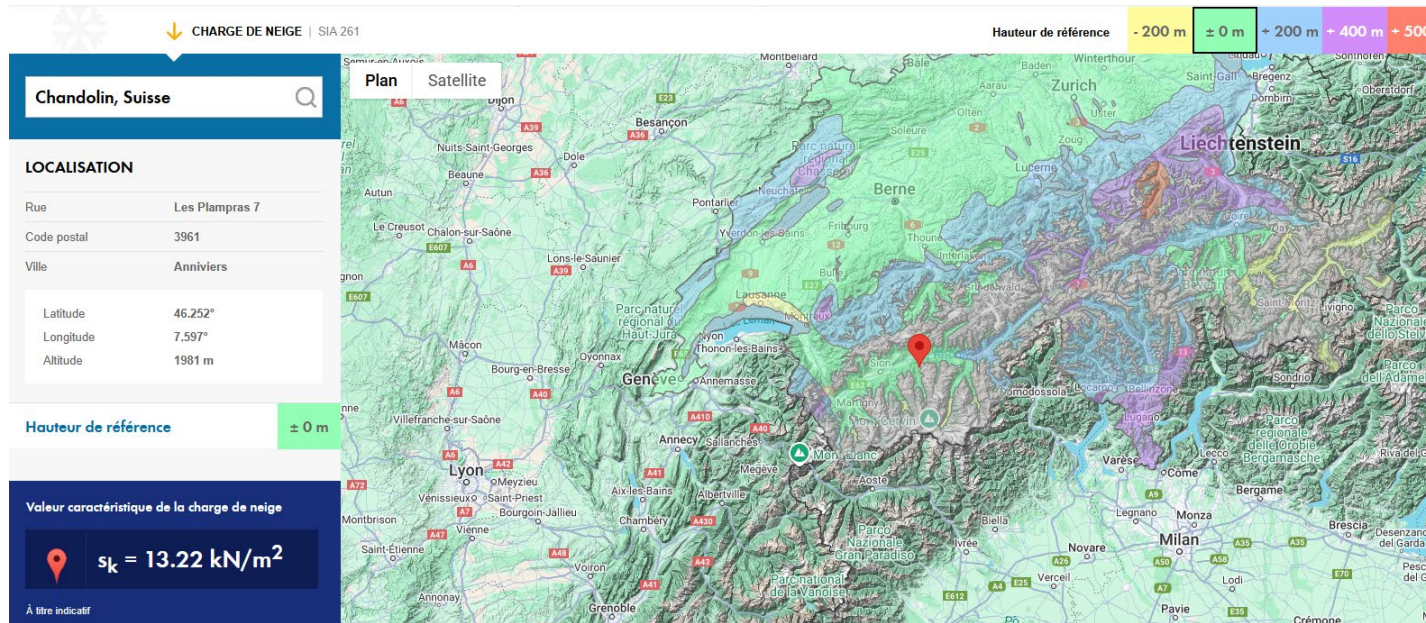
■ Charges de neige



<https://www.dlupal.com/fr/zones-de-neige-de-vent-et-de-sismicite/neige-sia-261.html?srsId=AfmBOOr990MF-ytrMQzripj2qcw9NtbFmA8HZSLow6uQUtwkpkNrsb#¢er=46.52755,6.56621&zoom=8&marker=46.52755,6.56621>

Principaux types d'actions (Norme SIA 261)

■ Charges de neige



<https://www.dlupal.com/fr/zones-de-neige-de-vent-et-de-sismicite/neige-sia-261.html?srsId=AfmBOor990MF-ytrMQzripj2qcw9NtbFmA8HZSLow6uQUtwkpkNrsb#¢er=46.2522028,7.5972519999999998&zoom=8&marker=46.2522028,7.5972519999999999>

■ Charges de vent

6.2.1 Pression dynamique

6.2.1.1 La pression dynamique q_p dépend de la nature du vent, de la rugosité du sol, de la morphologie du terrain et de la hauteur de référence. Elle est déterminée comme suit:

$$q_p = c_h \cdot q_{p0} \quad (11)$$

6.2.1.2 Le coefficient du profil de répartition du vent c_h tient compte du profil des vitesses du vent, en fonction de la hauteur sur sol z et de la rugosité du sol due à la présence de constructions et de végétation. Il est illustré à la figure 6 en fonction de la hauteur z et peut être calculé au moyen de l'équation suivante:

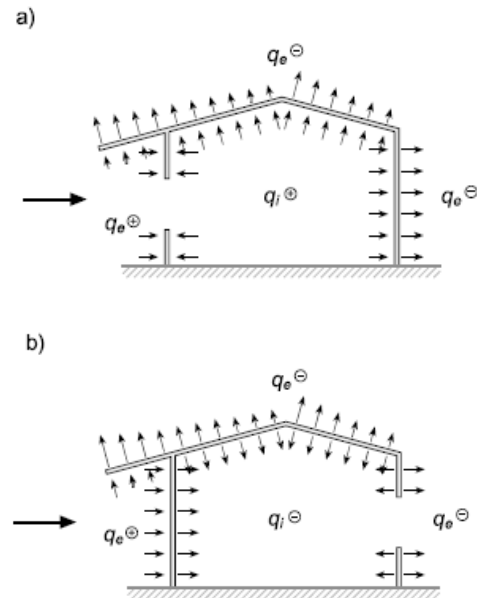
$$c_h = 1,6 \cdot \left[\left(\frac{z}{z_g} \right)^{\alpha_r} + 0,375 \right]^2 \quad (12)$$

6.2.2 Pressions exercées par le vent

6.2.2.1 Les valeurs caractéristiques des pressions exercées par le vent sur des surfaces extérieures et intérieures, respectivement, seront déterminées comme suit:

$$q_{ek} = c_{pe} \cdot q_p \quad (13)$$

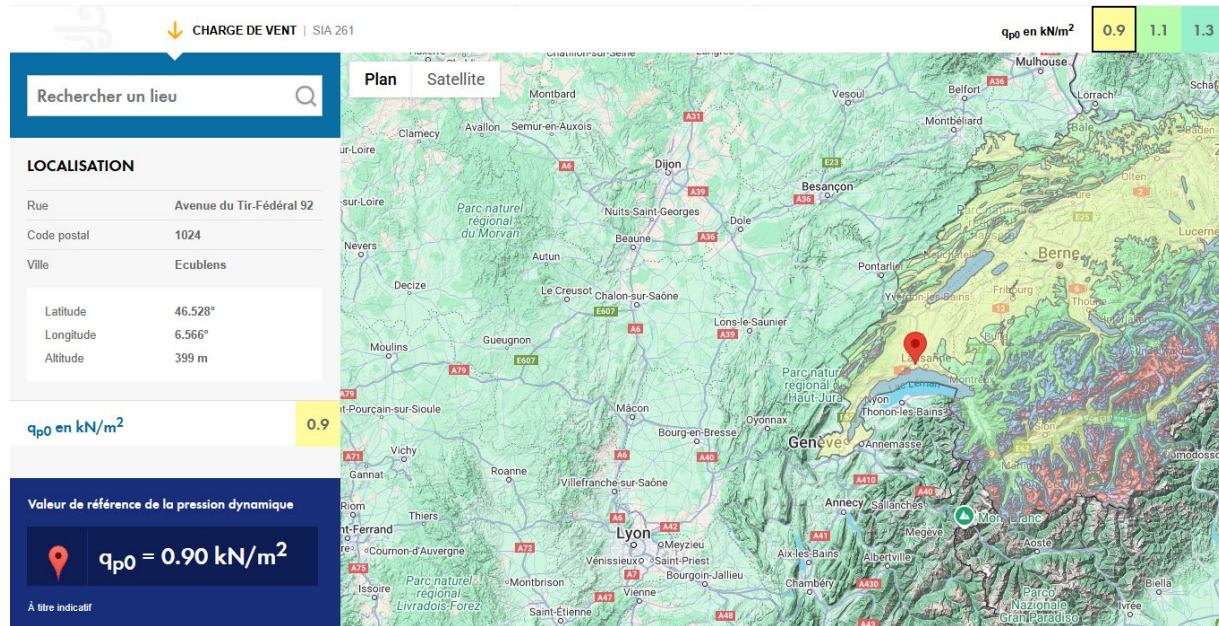
$$q_{ik} = c_{pi} \cdot q_p \quad (14)$$



Effet de l'orientation des ouvertures
du bâtiment

Principaux types d'actions (SIA 261)

■ Charges de vent

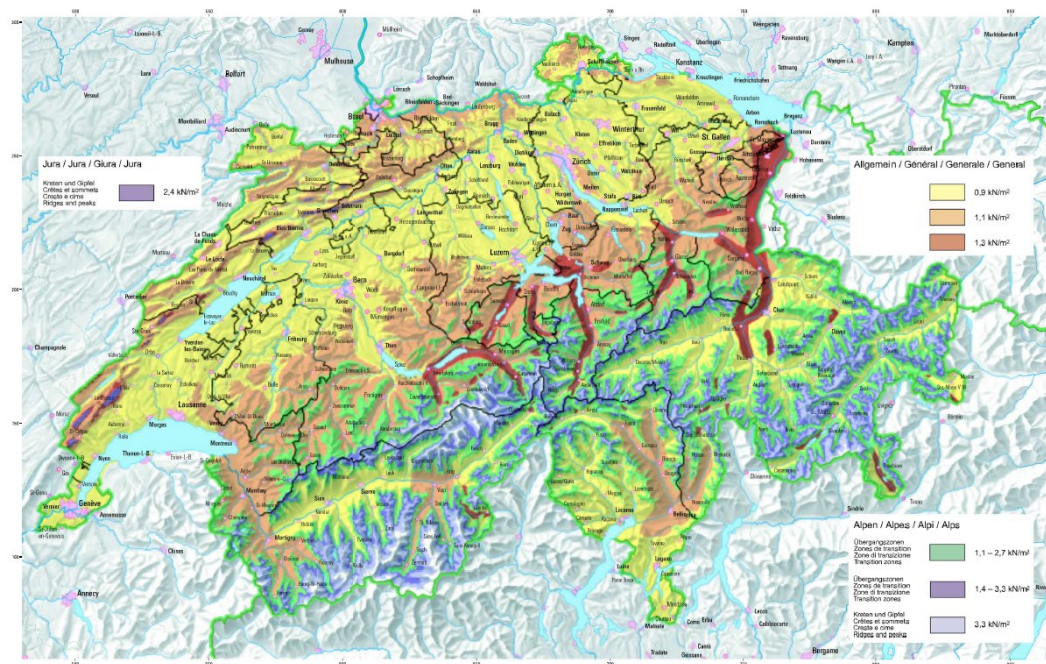


<https://www.dlubal.com/fr/zones-de-neige-de-vent-et-de-sismicite/vent-sia-261.html?¢er=46.52755,6.56621&zoom=8&marker=46.52755,6.56621#¢er=46.52755,6.56621&zoom=8&marker=46.52755,6.56621>

Principaux types d'actions (SIA 261)

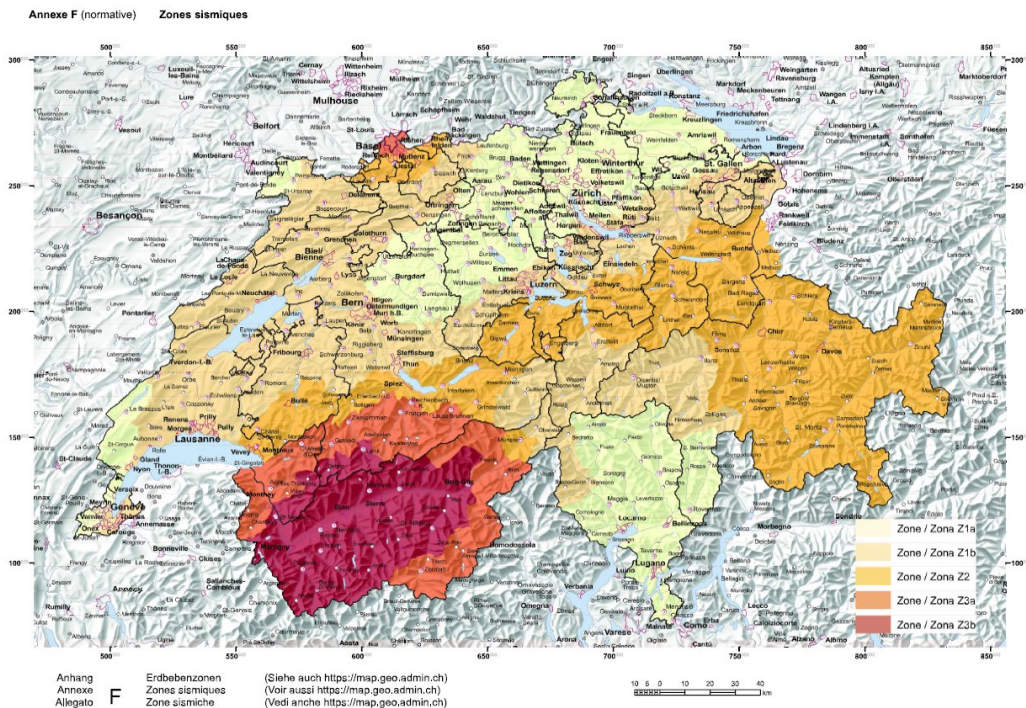
- Fonction de la localisation, forme des bâtiments et coté exposé

Annexe E (normative) Valeur de référence de la pression dynamique



Principaux types d'actions (SIA 261)

■ Actions sismiques



Principaux types d'actions

- Poids propre et charges variables (trafic ici)



Principaux types d'actions (SIA 261)

■ Charges d'exploitation (bâtiments)

Tableau 8 Catégories de surfaces utiles et valeurs caractéristiques des charges utiles

Catégorie	Genre de surface utile	Exemples	q_k en kN/m ²	Q_k en kN
A	Surfaces d'habitation	A1: Locaux dans les immeubles et les maisons d'habitation, services des hôpitaux, chambres d'hôtel, cuisines et toilettes	2	2 ¹⁾
		A2: Balcons	3	2 ¹⁾
		A3: Escaliers	4	2 ¹⁾
B	Bureaux		3	2 ¹⁾
C	Locaux de réunion	C1: Surfaces avec tables et chaises	3	4 ¹⁾
		C2: Surfaces avec sièges fixes	4	4 ¹⁾
		C3: Surfaces librement accessibles, surfaces de sport et de jeu, surfaces pouvant accueillir des rassemblements de personnes	5	4 ¹⁾
D	Surfaces de vente	Grands magasins, commerces	5	4 ¹⁾

Q_k répartie sur 50 x 50 mm

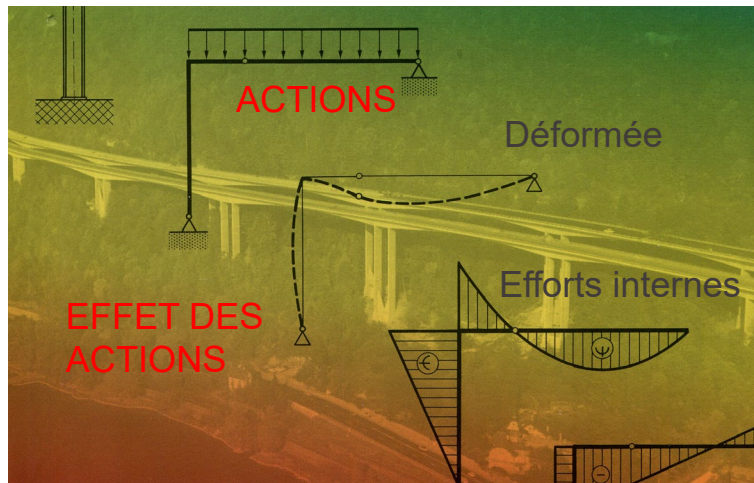
On applique soit q_k (charge répartie) soit Q_k (charge concentrée) pour chercher le cas le plus défavorable pour le dimensionnement

Extrait de la norme – catégories A, B, C, D

- Détermination des **effets des actions** sur l'ensemble de la structure porteuse et de ses éléments au moyen d'un modèle de la structure

Selon la norme SIA 260

Adapté d'après [2]



■ Autrice des dias (2023)
Prof. Katrin Beyer

■ Earthquake
Engineering and
Structural Dynamics
Laboratory

■ Dias supplémentaires
Prof. E. Denarié (2025)

■ Laboratoire de
comportement et
conception des
structures en béton

Réduction et équilibre

Statique

Prof. E. Denarié



A la fin de ce cours, vous saurez :

- Réduire forces et moments en un point quelconque
- Faire le schéma statique d'un corps isolé
- Formuler et résoudre les équations d'équilibre d'un corps
- Choisir judicieusement la forme des équations d'équilibre

1. Réduction

- L'idée
- Concept d' «équivalence statique»
- Réduction d'une force
- Réduction d'un moment
- Réduction d'un système de forces et de moments

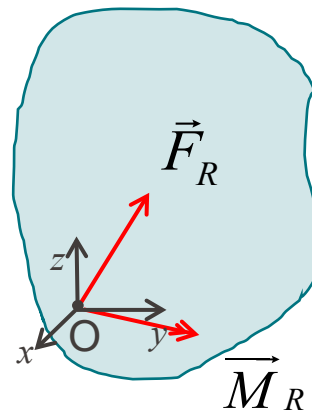
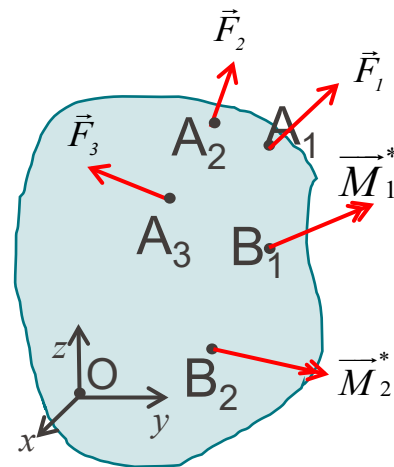
2. Equilibre

- Action et réaction
- Corps isolé
- Equations d'équilibre dans l'espace
- Equations d'équilibre dans le plan

- Remplacer un système de forces et moments par un autre qui lui est **statiquement équivalent**
- Le nouveau système de forces et moments doit être **plus simple et doit faciliter les calculs ultérieurs**

La réduction d'un système de forces et moments en un point

- Système de forces et moments :
 - \vec{F}_i $i = 1, 2, \dots, k$ avec points d'application A_i
 - \vec{M}_i^* $j = 1, 2, \dots, m$ avec points d'application B_j
- Réduction en O :
 - Calculer un système de forces et moments (\vec{F}_R, \vec{M}_R) statiquement équivalent
 - La force résultante \vec{F}_R a comme point d'application le point O
 - Le moment résultant est \vec{M}_R

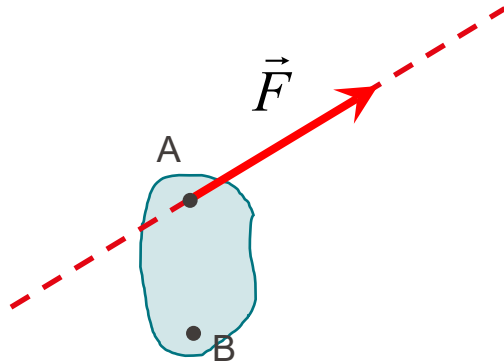


■ Table des cas étudiés

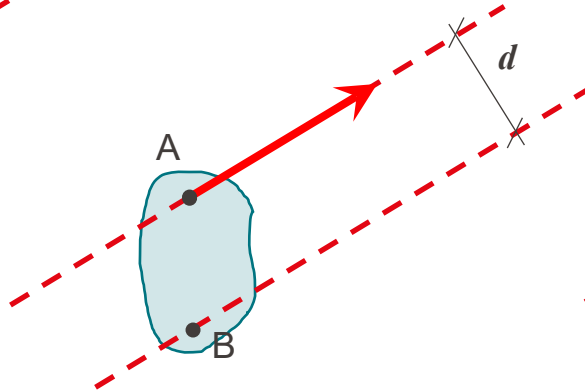
- **Cas 1 :** Réduire la force F du point A au point B
- **Cas 2 :** Réduire la force F du point A au point B quand B est sur la ligne d'action de F
- **Cas 3 :** Réduire le moment M du point O au point P
- **Cas général 2D :** La réduction en plan
- **Cas général 3D :** La réduction dans l'espace
- **Exemples**

Cas 1 : Réduire la force F du point A au point B

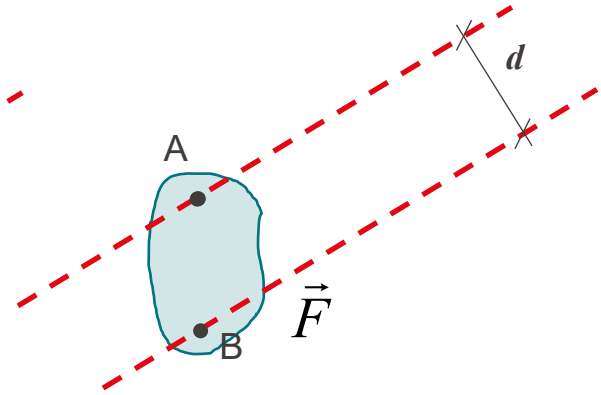
- Une force F en A est statiquement équivalente à une force F en B et un moment $\vec{M} = \overrightarrow{BA} \times \vec{F}$
 - Les systèmes 1, 2 et 3 sont statiquement équivalents



Système 1



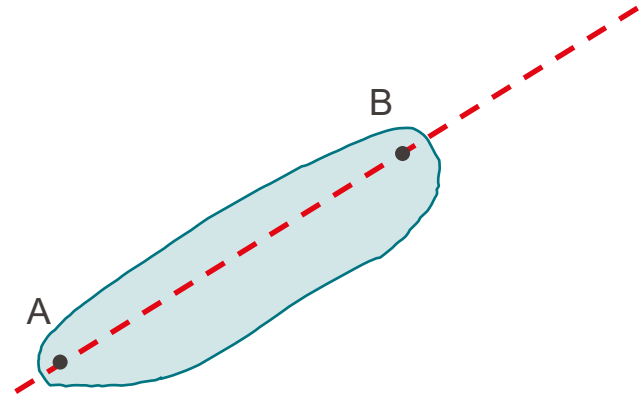
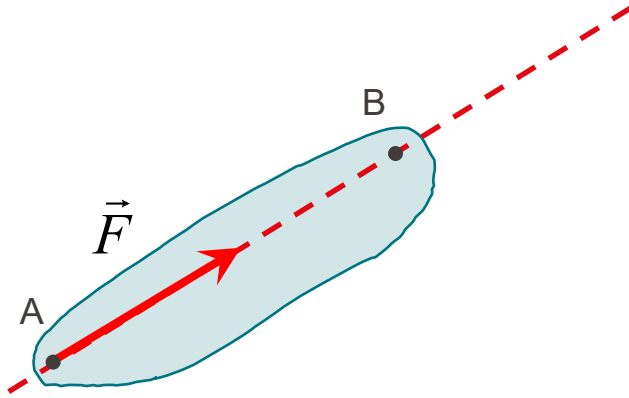
Système 2



Système 3

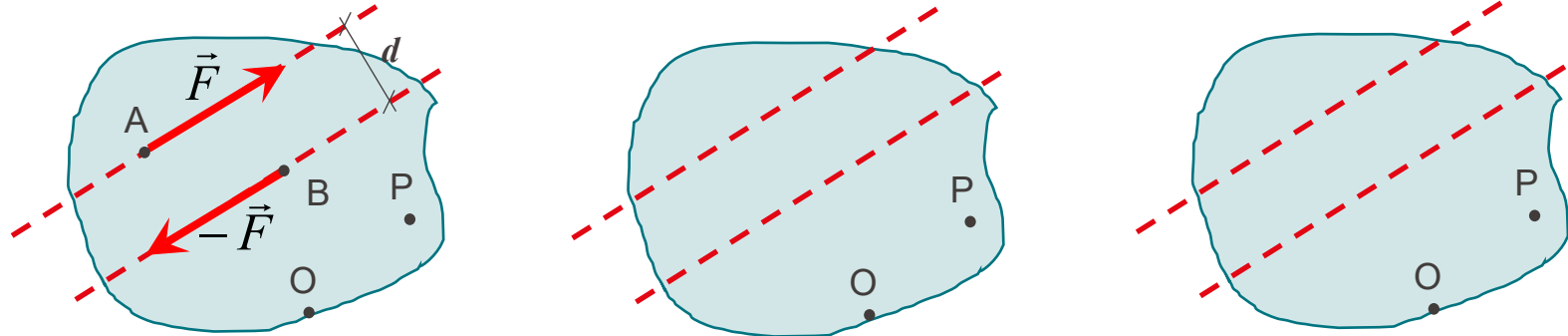
Cas 2 : Réduire la force F du point A au point B quand B est sur la ligne d'action de F

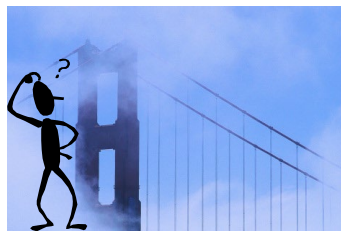
- Une force F en A est statiquement équivalente à une force F en B si B est sur la ligne d'action de la force F
 - Les forces ont le caractère de vecteurs **glissants** du point de vue de la statique



Cas 3 : Réduire le moment M du point O au point P

- Le vecteur moment est indépendant du choix du point d'application O : c'est un vecteur **libre**.
- Un moment M au point O est statiquement équivalent à un moment M au point P (O et P sont des points quelconques)





A votre tour!

1. Remplacer les charges par deux forces concentrées statiquement équivalentes (infinité de solutions)
2. Calculer les éléments de réduction au point O (solution unique)

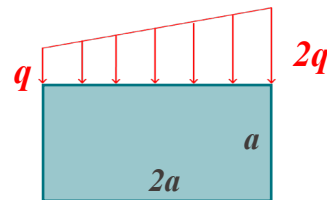
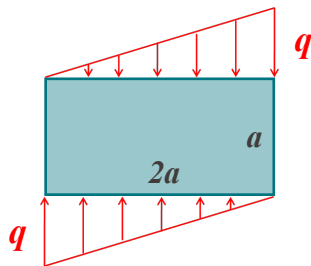
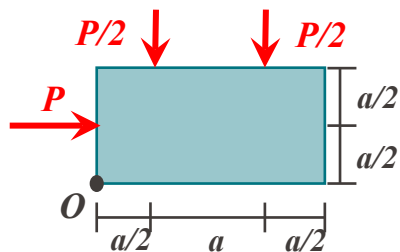


Table des matières :

1. Principe de l'action et de la réaction
2. Principe du corps isolé
3. Equations d'équilibre dans l'espace et dans le plan
4. Formes principales des équations d'équilibre
5. Démarche pour formuler les équations d'équilibre d'un solide
6. Formes équivalentes des équations d'équilibre
7. Exemples (cas plan)

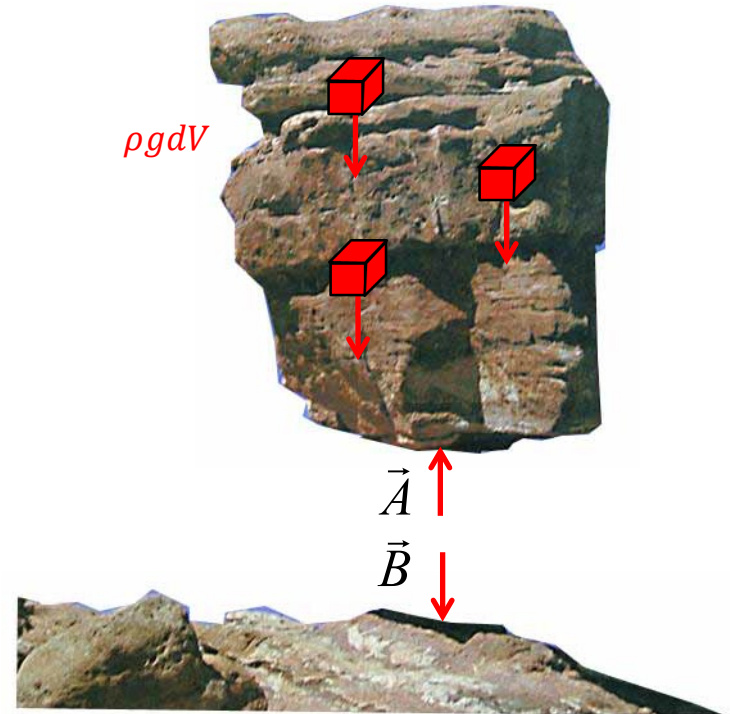
Principe de l'action et de la réaction

- Un solide qui exerce une action sur un autre solide reçoit de celui-ci une réaction qui a la même grandeur, la même ligne d'action mais un sens opposé à l'action.
 - Ce principe s'applique tant aux forces qu'aux moments.
- **Action et réaction sont égales, ont la même ligne d'action, et sont directement opposées : $\vec{A} = -\vec{B}$**



Le principe du corps isolé

- Pour analyser une structure (le rocher), il faut d'abord décider clairement quelle structure ou quelle partie de la structure on désire traiter
 - Isoler la structure de son entourage à l'aide de coupes
 - Introduire **toutes** les forces et **tous** les moments qui agissent sur le corps
 - *Ceci s'appelle le schéma statique du corps isolé*



Charge volumique (poids propre total) : $\rho g V$

- ρ = densité de la pierre
- g = accélération de la pesanteur
- V = volume de la pierre

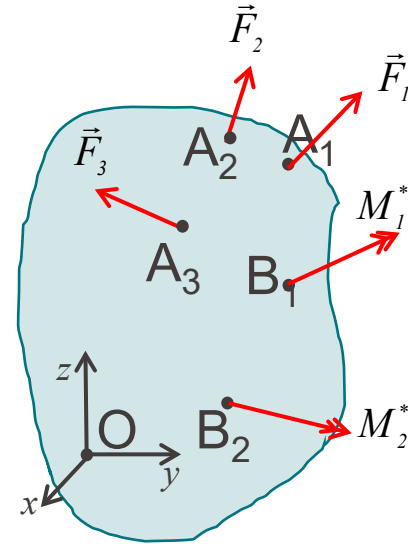
- Un système de forces et moments en équilibre est statiquement équivalent à zéro.
- Equations d'équilibre :

$$\bullet \vec{F}_R = \sum_{i=1}^k \vec{F}_i = \vec{0}$$

$i = 1, \dots, k$ toutes les forces qui agissent sur le corps

$$\bullet \vec{M}_R = \sum_{i=1}^k \overrightarrow{OA_i} \times \vec{F}_i + \sum_{j=1}^m \vec{M}_j^* = \vec{0}$$

$j = 1, \dots, m$ tous les moments qui agissent sur le corps



Formes principales des équations d'équilibre

■ Equilibre dans l'espace (6 degrés de liberté)

- Equilibre en translation

$$\sum_{tout} F_x = 0$$

$$\sum_{tout} F_y = 0$$

$$\sum_{tout} F_z = 0$$

- Equilibre en rotation

$$\sum_{tout} (yF_x - zF_y) + \sum_{tout} M_x^* = 0$$

$$\sum_{tout} (zF_x - xF_z) + \sum_{tout} M_y^* = 0$$

$$\sum_{tout} (xF_y - yF_x) + \sum_{tout} M_z^* = 0$$

■ Equilibre dans le plan (3 degrés de liberté)

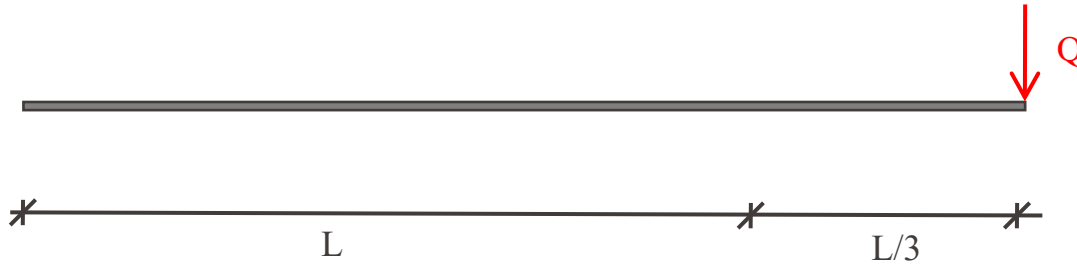
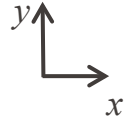
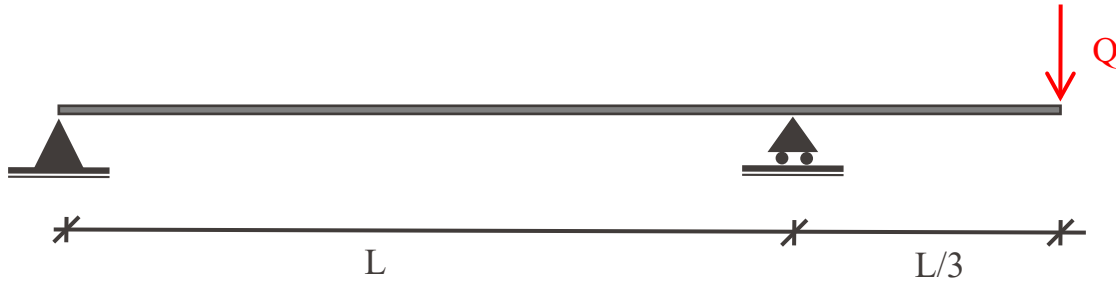
$$\sum_{tout} F_x = 0$$

$$\sum_{tout} F_y = 0$$

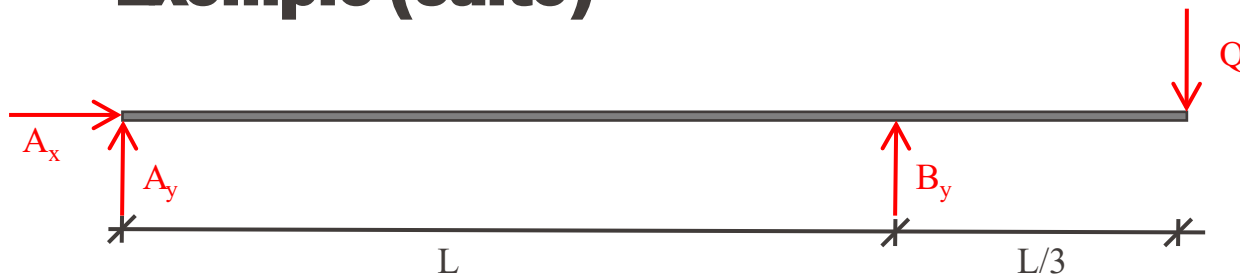
$$\sum_{tout} (xF_y - yF_x) + \sum_{tout} M_z^* = 0$$

Exemple : poutre simple avec porte-à-faux

Corps isolé \rightarrow extérioriser les réactions



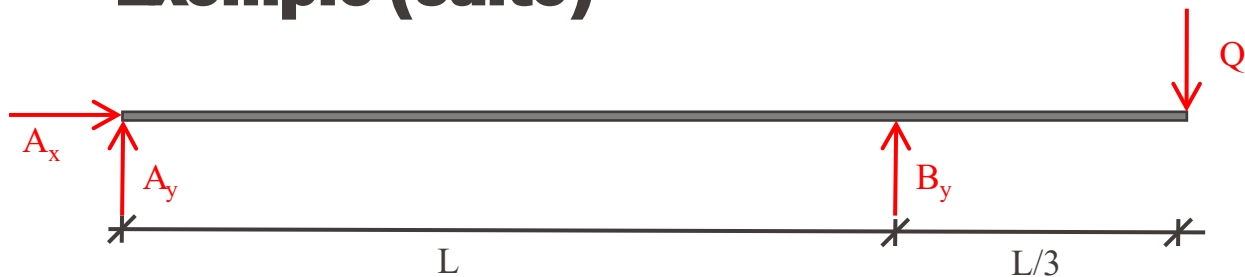
Exemple (suite)



Equations d'équilibre forme 1 :

- 2 translations
- 1 rotation

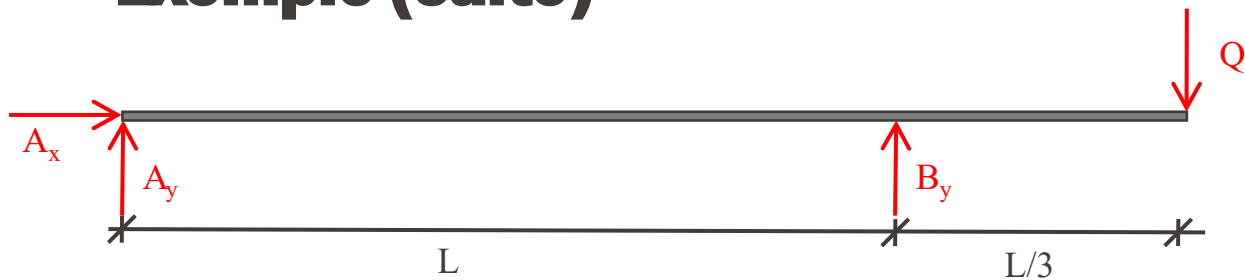
Exemple (suite)



Equations d'équilibre forme 2 :

- 1 translation
- 2 rotations

Exemple (suite)



Equations d'équilibre forme 3 :

- 0 translation
- 3 rotations

Remarque sur le signe dans les calculs d'équilibre

- Les forces et moments connus sont dessinés avec leur sens réel
- Les forces et moments inconnus sont dessinés avec un sens arbitraire
- Une valeur négative pour une force ou un moment inconnu signifie que la force ou le moment agit en sens inverse à celui dessiné
- **Il ne faut jamais changer le sens des vecteurs dans le schéma original**

Les solutions obtenues pour les deux systèmes statiques sont complètement équivalentes :

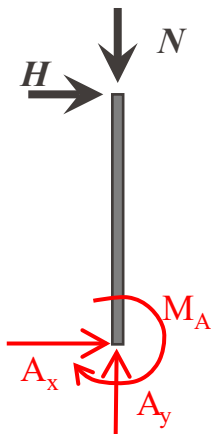
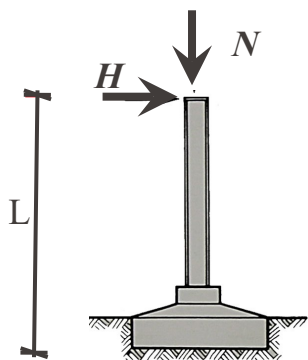


Schéma statique 1

Solution :

- $A_x = -H$
- $A_y = N$
- $M_A = -H \cdot L$

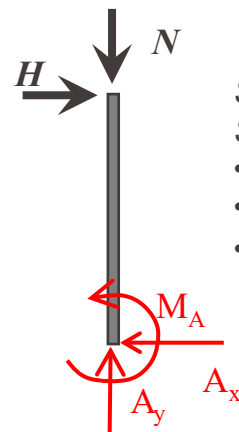


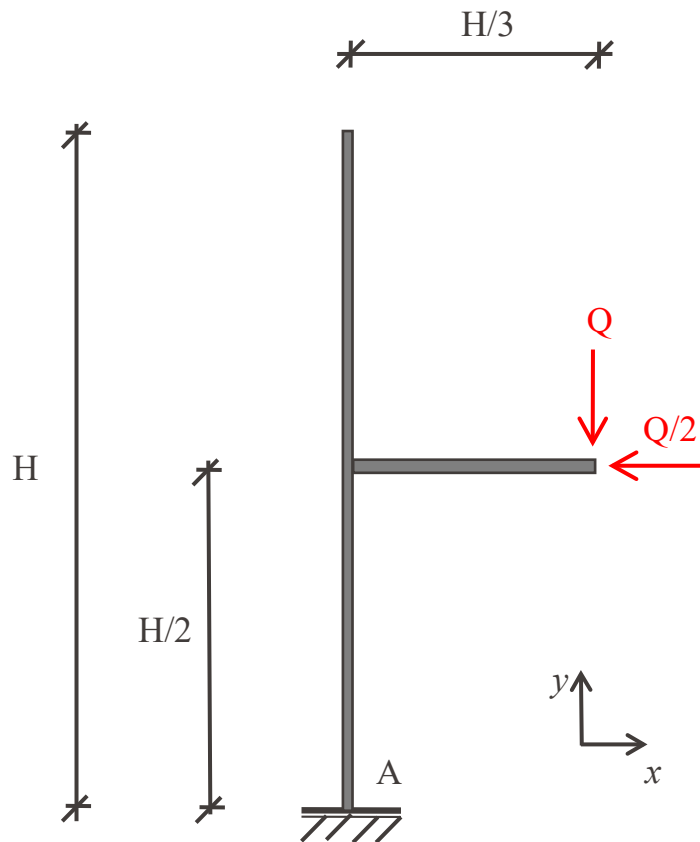
Schéma statique 2

Solution :

- $A_x = H$
- $A_y = N$
- $M_A = H \cdot L$

Exemple : colonne encastrée

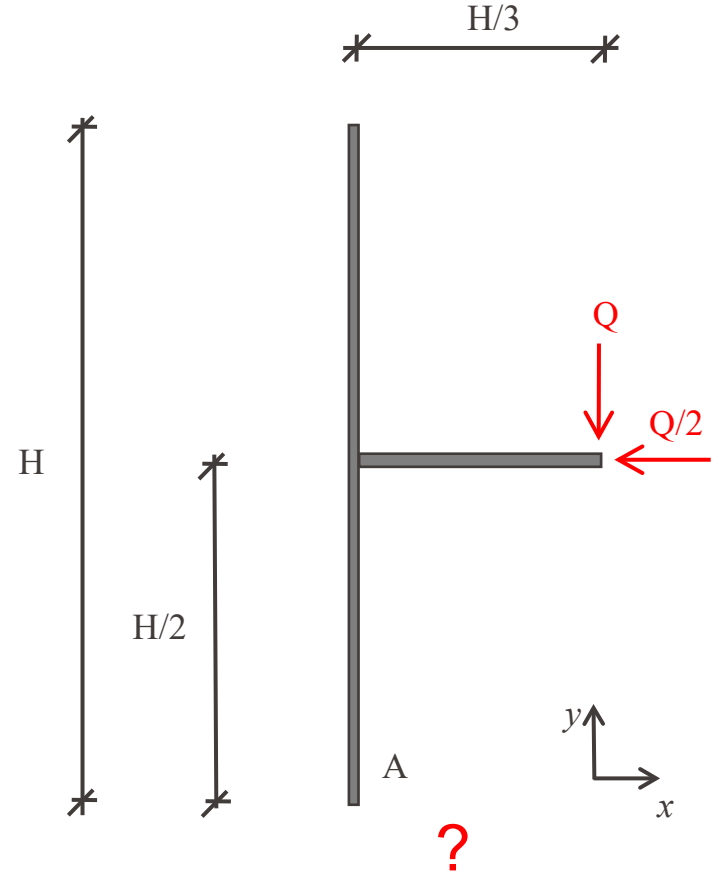
Corps isolé → Extérioriser les réactions

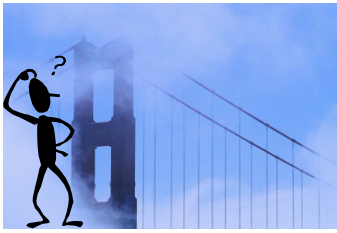


Exemple : colonne encastrée

Corps isolé → extérioriser les réactions

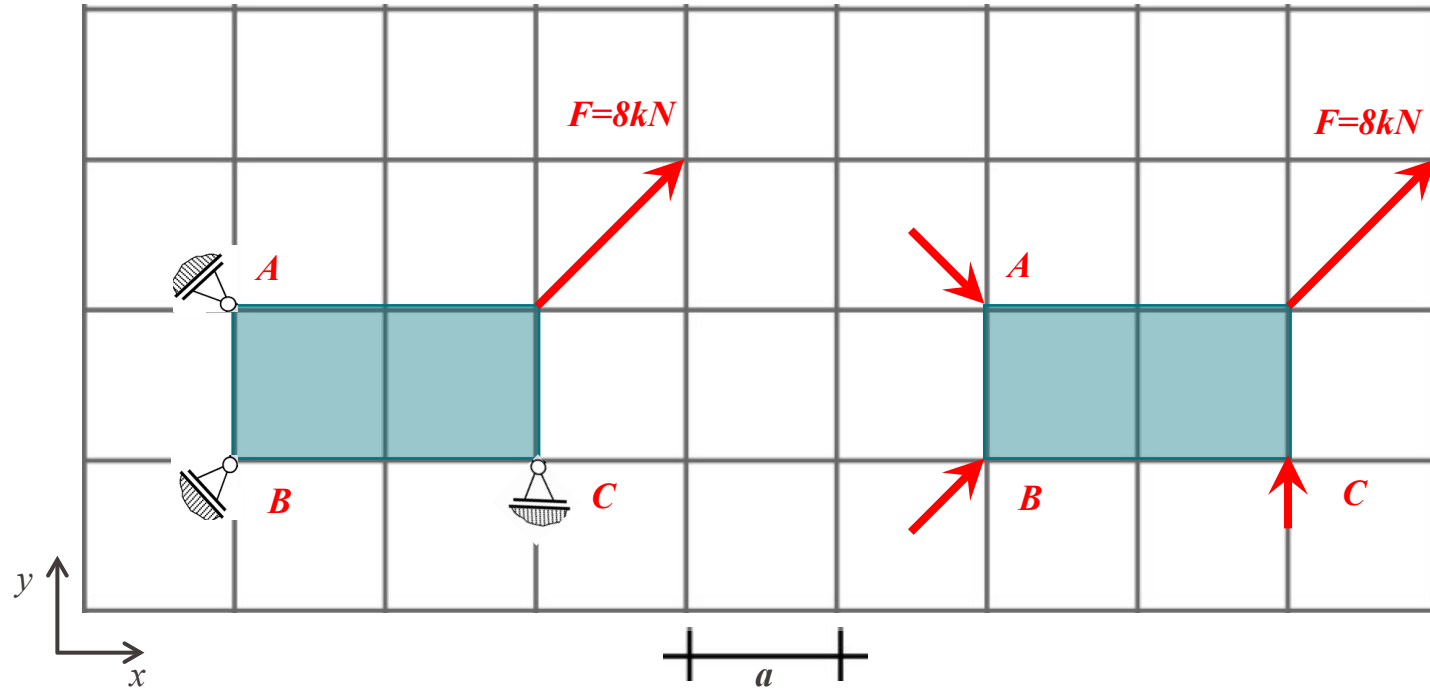
Calculer les valeurs des réactions

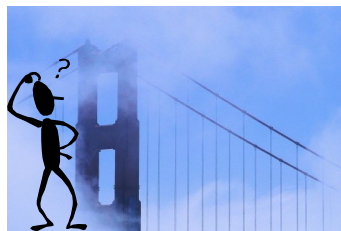




A votre tour!

Autour de quels points doit-on formuler l'équilibre en rotation pour que chaque équation ne contienne qu'une seule inconnue ?



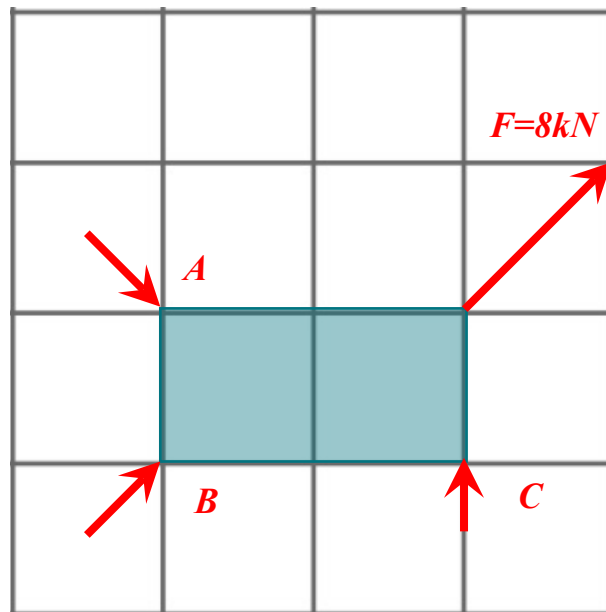


A votre tour!

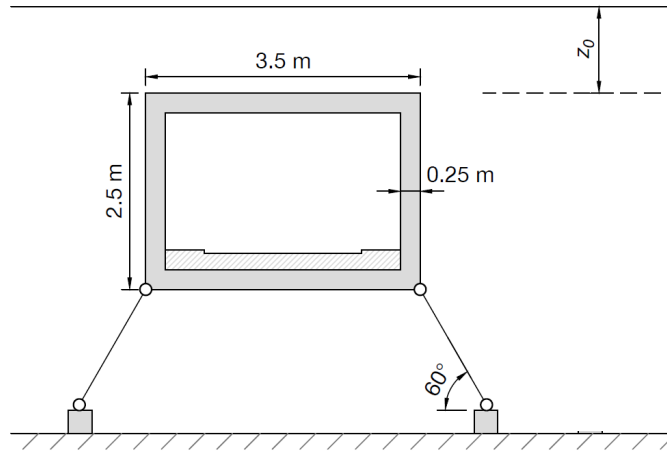
Résultats :

- $A = -2.67 \text{ kN}$
- $B = -5.33 \text{ kN}$
- $C = -3.77 \text{ kN}$

Contrôle :



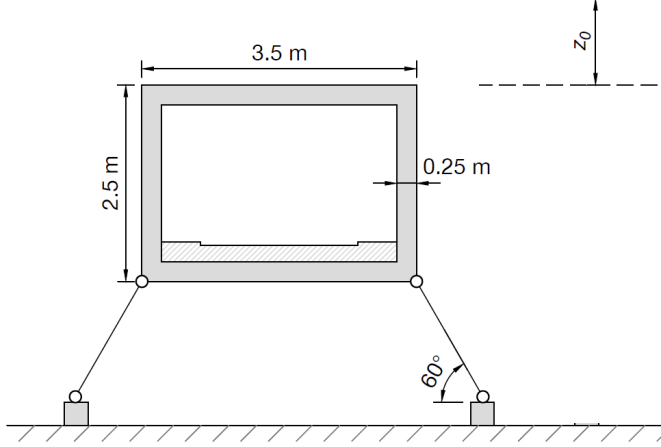
Tunnel immergé



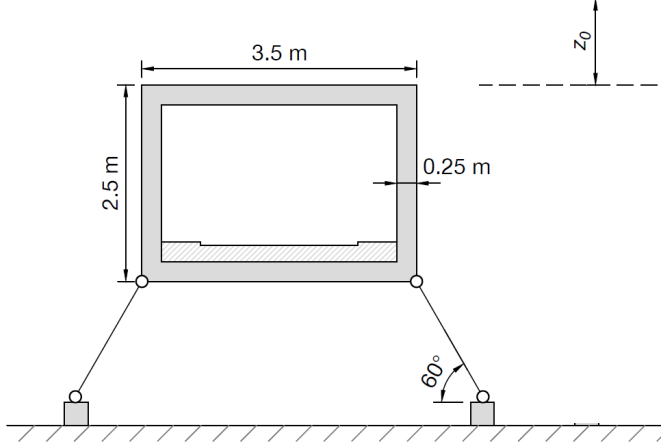
Un tunnel rectangulaire en béton armé est immergé dans l'eau (eau : $\gamma_e = 10 \text{ kN/m}^3$, béton : $\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$). Il est ancré au fond par des paires de câbles disposés tous les 6 m. La surcharge admise dans le tunnel est de $10 \text{ kN/m}'$.

- Dessiner la distribution de la poussée hydrostatique appliquée sur le tunnel.
- Déterminer l'orientation et la valeur de la résultante de la poussée hydrostatique qui s'applique sur le tunnel. Cette force est aussi appelée "Poussée d'Archimède".
- Représenter dans un schéma toutes les forces qui agissent sur le tunnel (schéma de corps libre). Calculer la force reprise par chaque câble.

Exemple d'application

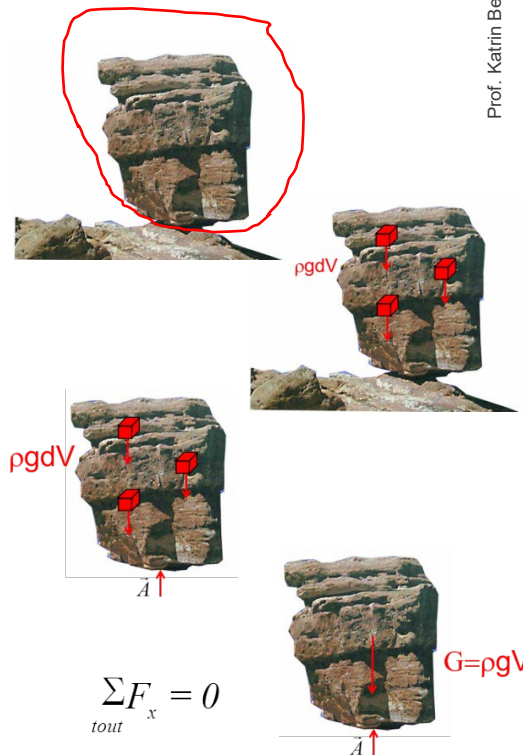


Exemple d'application



Démarche pour formuler les équations d'équilibre d'un solide

- Décider clairement quelle structure ou quelle partie de la structure on désire traiter
- Introduire toutes les forces et moments qui agissent sur la structure
- Isoler la structure de son entourage à l'aide de coupes («corps isolé») et extérioriser les réactions
- Réduire des forces si cela facilite les calculs (par exemple les charges distribuées)
- Formuler l'équilibre avec 3 équations (2D) ou 6 équations (3D) d'équilibre indépendantes (choisir judicieusement)
- Contrôler les calculs avec 1 ou 2 autres équations
par exemple $\sum M_B = 0$



$$\sum_{tout} F_x = 0$$

$$\sum_{tout} F_y = 0$$

$$\sum_{tout} M_A = 0$$

Formes principales et formes équivalentes des équations d'équilibres

- Nombre d'équations d'équilibre indépendantes:
 - Cas plan : 3 degrés de liberté 3 équations
 - Cas 3D : 6 degrés de liberté 6 équations

- Cas plan

- Forme principale des équations d'équilibre (l'équilibre est calculé avec) :
 - 2 équations d'équilibre en translation
 - 1 équation d'équilibre en rotation
- Mais souvent, un autre choix d'équations est plus judicieux

$$\sum_{tout} F_x = 0$$

$$\sum_{tout} F_y = 0$$

$$\sum_{tout} M_A = 0$$

3 formes équivalentes des équations d'équilibre (EdE) dans le plan

■ Forme principale

- EdE Forme 1

- 2 translations
- 1 rotation

$$\sum_{\text{tout}} F_x = 0 \quad \sum_{\text{tout}} F_y = 0 \quad \sum_{\text{tout}} M_A = 0$$

■ Formes équivalentes

- EdE Forme 2

- 1 translation
- 2 rotations
- l'axe x n'est pas normal à \overrightarrow{AB}

$$\sum_{\text{tout}} F_{\bar{x}} = 0 \quad \sum_{\text{tout}} M_A = 0 \quad \sum_{\text{tout}} M_B = 0$$

- EdE Forme 3

- 0 translation
- 3 rotations
- les points A , B et C ne sont pas sur le même axe

$$\sum_{\text{tout}} M_A = 0 \quad \sum_{\text{tout}} M_B = 0 \quad \sum_{\text{tout}} M_C = 0$$

Chapitres à étudier dans le TGC 1

- **Chapitre 1** : Actions 1.3
- **Chapitre 2** : Forces, moments et principes 2.3
- **Chapitre 3** : Réduction et équilibre (en entier)

Références des illustrations par ordre d'apparition

- [1] [Rainbow Bridge](#) © Ad Meskens, [CC BY-SA 3.0](#)
- Refs ED Actions
- [2] Icône exercices: [Figure](#) © Dukesy68, [CC BY-SA 4.0](#) ; [Pont du Golden Gate](#), [CC0 1.0](#)
- [3] Rocher : Frey, François. Statique appliquée (TGC volume 1) – Analyse des structures et milieux continus. EPFL Press, 2005.