

Prof. Alain Nussbaumer

## COURS CIVIL235, STRUCTURES EN MÉTAL

### EXERCICE 7: EXEMPLE EXAMEN INTERMEDIAIRE

#### TYPE DE CONTRÔLE

Examen de 2h.

L'examen compte **53 points** au total et il se compose de deux parties dont voici la répartition des points :

- Partie théorique **20 points**
- Partie exercice **33 points**

La note maximale de 6.0 est obtenue avec 45 points.

#### DOCUMENTS AUTORISÉS

- Résumé sur une page A4 recto-verso
- Tables SZS et normes SIA

#### REMARQUE

*Toutes vos réponses doivent être justifiées brièvement (par ex. avec référence de la formule utilisée), vos hypothèses indiquées et étayées.*

**Nom :** .....

**Prénom :** .....

**Points :**

**NOTE :**

## PARTIE : THÉORIQUE (AU TOTAL 16 POINTS)

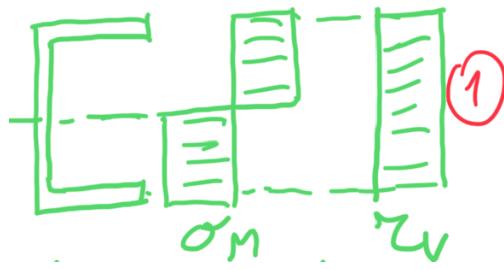
*Pour la partie théorique, toutes les réponses doivent figurer sur les feuilles distribuées.*

### Question 1 (4 points)

Dans un profilé UNP soumis à la fois à un moment de flexion  $M$  et à un effort tranchant  $V$ , expliquer en vous servant de schémas comment sont repris les efforts selon chaque axe ?

Réponse :

(1) Selon l'axe fort, les ailes du profilé reprennent le moment de flexion  $M_y$  car elles forment l'essentiel de l'inertie selon l'axe fort  $y$ ,  $I_y$ , alors que l'âme reprend l'effort tranchant  $V_z$  car elle constitue la majeure partie de l'aire efficace  $A_w$  ou  $A_v$ .



(½) Si  $V_{Ed}$  trop élevé (par ex. > 0,5  $V_{Rd}$ ), réduction de  $M_{y,Rd} \rightarrow M_{y,red,Rd}$

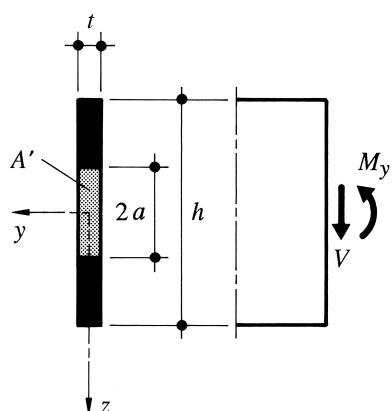
(1) Selon l'axe faible, les ailes du profilé reprennent à la fois  $M_z$  et  $V_y$ , alors que « l'âme » n'aidera qu'à reprendre le moment de flexion.

(½) Réduction de  $M_{y,Rd} \rightarrow M_{y,red,Rd}$  pour tout  $V_{Ed}$  car mobilisent les mêmes surfaces.

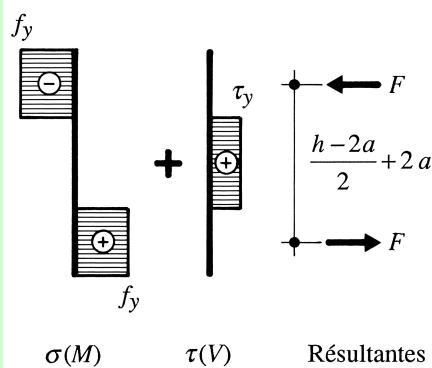


### Question 2 (4 points)

Soit une section rectangulaire soumise simultanément à un moment de flexion et à un effort tranchant. Soit  $A'$  la partie de la section dédiée à la reprise de l'effort tranchant. Démontrer la formule reproduite ci-après pour le moment plastique réduit plastique:



$$M_{y,pl,V} = f_y \cdot t \cdot \left( \frac{h^2}{4} - a^2 \right)$$



Moment repris par couple de forces et bras de levier x :

$$F = f_y \cdot t \cdot \left( \frac{h-2a}{2} \right)$$

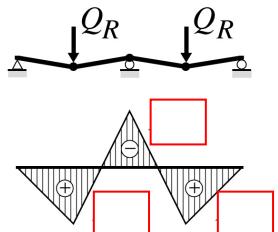
$$x = 2a + \left( \frac{h-2a}{2} \right)$$

Donc :

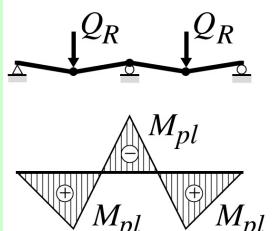
$$M_{y,pl,V} = f_y \cdot t \cdot \left( \frac{h^2}{4} - a^2 \right)$$

### Question 3 (4 points)

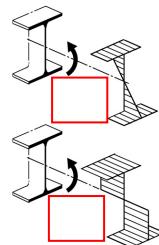
Complétez la figure ci-dessous et servez-vous en pour expliquer la différence entre les méthodes de calcul EP et PP.



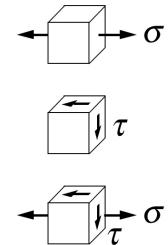
a)



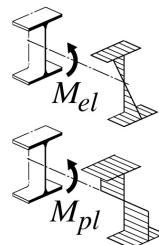
a) mécanisme de ruine structure



b)



c)

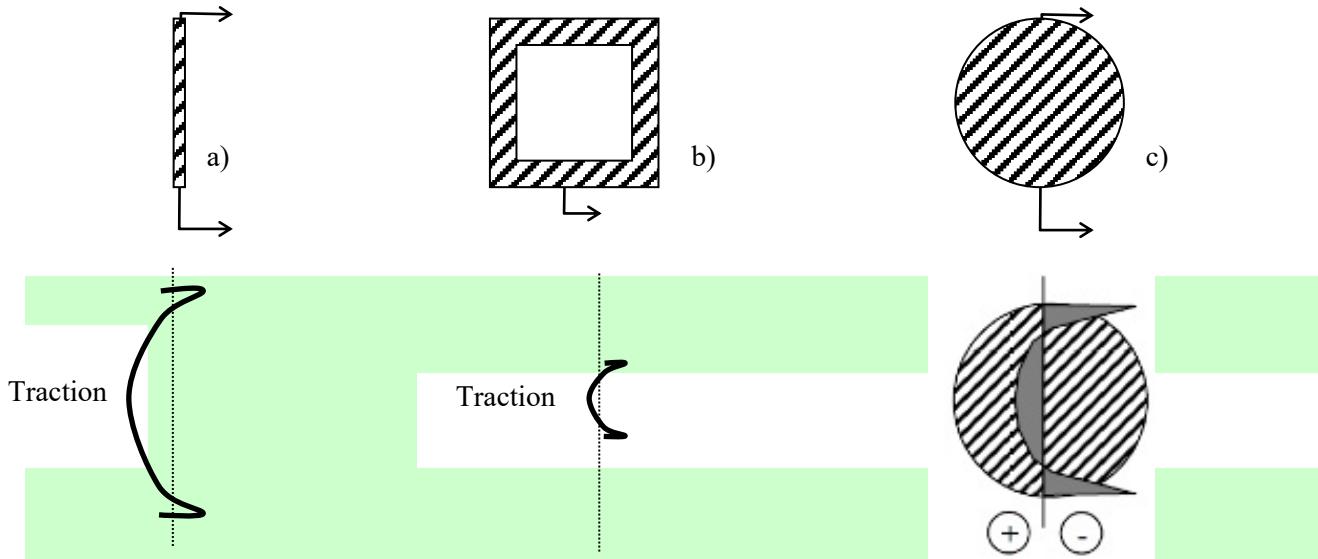


b) résistance en section c) contraintes

La différence vient du calcul des effets d'actions : En calcul PP, elles sont basées sur une analyse plastique, alors qu'en calcul EP elles sont basées sur une analyse élastique. Ensuite, dans les deux méthodes, on utilise un calcul plastique pour la résistance en section.

## Question 4 (4 points)

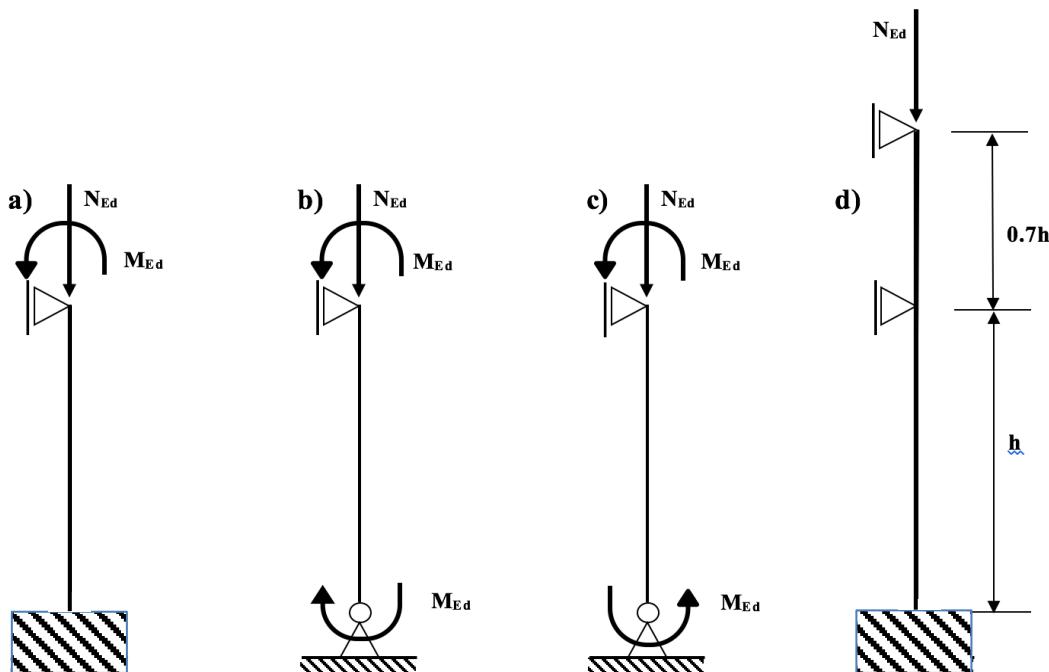
Pour les 3 sections laminées suivantes (aucun oxycoupage), dessiner qualitativement selon les coupes indiquées l'allure des contraintes résiduelles en justifiant brièvement. Dans quelle section seront-elles les plus importantes ?



Les contraintes résiduelles sont les plus importantes dans la section c), car le gradient de refroidissement y est le plus important à cause de sa massivité.

## Question 5 (4 points)

Prenons le cas de plusieurs poteaux soumis à un effort de compression et un moment de flexion tel que représentés ci-dessous ; regardez bien les conditions d'appui. Classer ces poteaux du plus résistant au moins résistant. Pour les cas représentés, faut-il également vérifier la résistance en section, en plus de la vérification à la stabilité ?



## Classement du plus résistant vers le moins résistant

Résistance	Le plus résistant	→		Le moins résistant
Poteaux	d	a	c	b
Justification	$h_k = 0.7 h$ uniquement N	$h_k = 0.7 h$ M et $-M/2$ $\omega = 0.4$	$h_k = h$ M et -M $\omega = 0.4$	$h_k = h$ M = cst

Vérification de la section :

Oui	a et c
Non	b et d

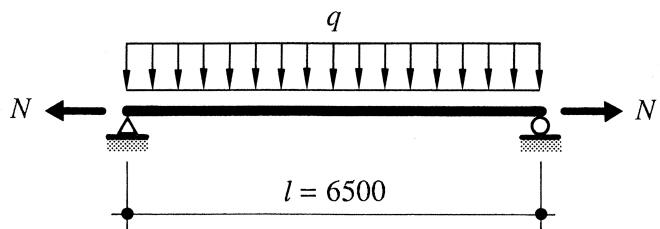
## PARTIE EXERCICE : (AU TOTAL 33 POINTS)

### PROBLEME 1 (13 POINTS)

#### Donnée

Soit une poutre simple de portée  $l = 6.5$  m, sollicitée par un effort de traction  $N$  et une charge verticale uniformément répartie  $q$  (voir figure 1), dont les valeurs de calcul sont respectivement  $N_{Ed} = 225$  kN et  $q_{Ed} = 10$  kN/m.

Dimensionner cette poutre en choisissant un profilé laminé en double té de la série HEA en acier S 235 et vérifiez les différentes interactions. Utilisez la méthode EP et la formule la plus favorable pour les profilés laminés en double té bisymétriques. On ne tiendra pas compte dans le cas présent des éventuels problèmes de stabilité.



**Figure 1 – Poutre simple sollicitée par un moment de flexion et un effort normal**

Solution :

TGC 10, exemple numérique 4.9

Et vérification que l'on peut aussi reprendre l'effort tranchant.

## PROBLEME 2 (20 POINTS)

### Donnée

Soit la petite halle présentée à la Figure 2. On veut vérifier la traverse du cadre central. Les charges sont transmises aux traverses par le biais de pannes. Les pannes sont boulonnées sur l'aile supérieure des traverses, comme représenté à la Figure 1. Le système statique de la traverse peut être représenté par une poutre simple, sur laquelle s'appliquent des charges ponctuelles transmises par les pannes (cf. Figure 4). La traverse est un profilé laminé HEB 550, en acier S355. Le système statique des pannes peut être quant à lui être représenté par une poutre sur trois appuis (cf. Figure 3). Les poids propres des pannes et de la traverse sont négligés dans les vérifications de cet exercice. Après avoir considéré d'autres situations de projet, il apparaît que la situation de projet la plus défavorable correspond à des charges ponctuelles ( $G + Q_{Ed} = 420 \text{ kN}$ ).

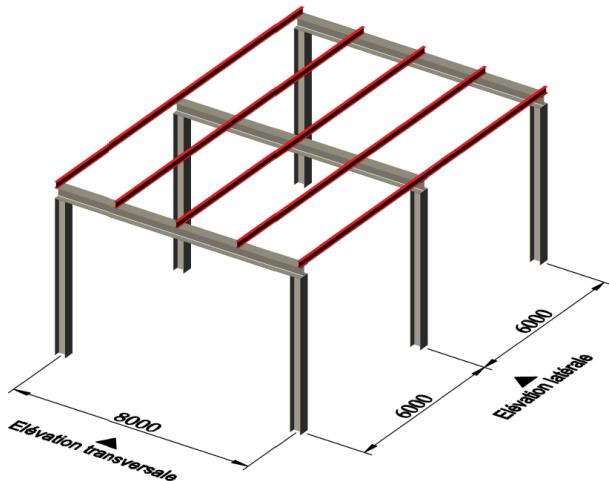


Figure 2 - Vue en 3D de la halle

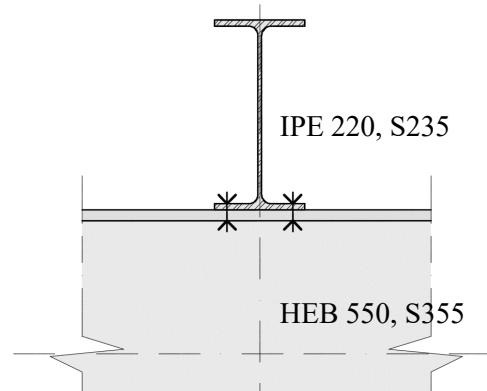


Figure 1 – Détail d'assemblage pannes / traverses

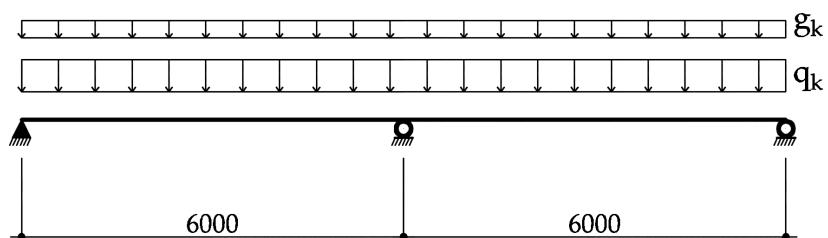


Figure 3 – Système statique des pannes (élévation latérale)

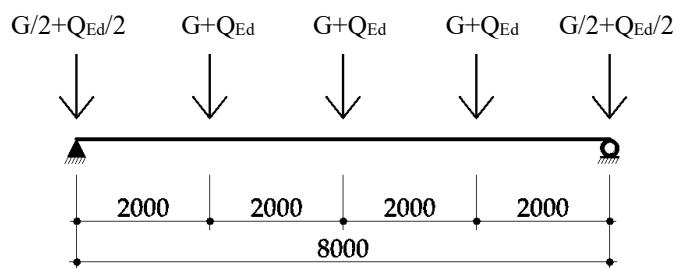


Figure 4 – Système statique des traverses (élévation transversale)

## Questions

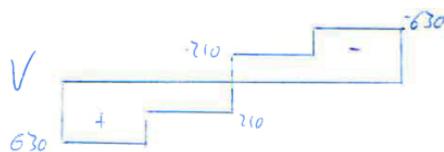
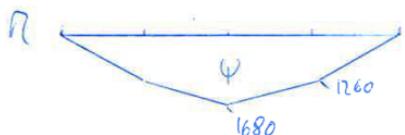
1. Vérifier la sécurité structurale de la traverse, en justifiant la méthode de calcul utilisée. Ne pas négliger les problèmes de stabilité. (10 points)
2. En admettant que les 5 charges ponctuelles introduites par les pannes peuvent être représentées par une charge uniformément répartie équivalente sur la traverse, vérifier l'état-limite de service (ELS), pour le cas de charge suivant (pour info, il s'agit d'un cas de charge quasi-permanent)  
 $E_d, ELS = g_k + \psi_2 q_{k,neige}$   
On admettra les charges suivantes  $g_k = 10 \text{ kN/m}$  et  $\psi_2 q_{k,neige} = 12.5 \text{ kN/m}$   
La valeur indicative de flèche limite est donnée en annexe, SIA 260, Tableau 3 (5 points)
3. Considérer à présent les poids propres des pannes  $g_{k1} = 5\% g_k$  et de la traverse, en assimilant à nouveau les charges des pannes à une charge répartie sur la traverse. La sécurité structurale est-elle vérifiée ?  
Donner l'erreur commise en négligeant les poids propres. (5 points)

$$1. \quad G_{ed} + Q_{ed} = 420 \text{ kN}$$

$$R_A = R_B = \frac{G_{ed} + Q_{ed}}{2} = 840 \text{ kN}$$

$$\Pi_{\frac{1}{4} \text{ travée}} = (R_A - (G_{ed} + Q_{ed})) \cdot \frac{L}{4} = (840 - 420) \cdot \frac{8}{4} = 1260 \text{ kNm}$$

$$\Pi_{\frac{1}{2} \text{ travée}} = (R_A - (G_{ed} + Q_{ed})) \cdot \frac{L}{2} - (G_{ed} + Q_{ed}) \cdot \frac{L}{4} = 1680 \text{ kNm}$$



• Vérification en section :

HEB 550 → Classe de section 1  
 S355

$$V_{ed} = 630 \leq 1954 = V_{pl, rd} \rightarrow \text{OK} \quad [\text{S2S C5, p27}]$$

$$V_{ed} \leq \frac{1}{2} V_{pl, rd} \rightarrow \text{Pas d'interaction } \Pi-V$$

$$\Pi_{ed} = 1680 \leq 1890 = \Pi_{q, pl, rd} \rightarrow \text{OK} \quad [\text{S2S C5, p27}]$$

• Vérification stabilité:

$L_b = 7,0 \text{ m}$  (aile sup. comprimée, longueur entre 2 panniers)

$$\frac{N_{ed}}{N_{rd}} = 0 \leq 0.15 \rightarrow \text{conditions tab. 6 SIA 263 valables}$$

Method PP:  $L_{cr} = 1.35 \cdot i_z \left( \frac{E}{f_y} \right)^{0.5}$ , avec  $\Psi = \frac{N_{ed,min}}{N_{ed,max}} = \frac{1260}{1680} = 0.75 > 0.5$

$$L_{cr} = 1.35 \cdot 71.7 \cdot \left( \frac{210'000}{355} \right)^{0.5} \quad [S25 (5, p. 40)]$$

$$= \underline{2'354 \text{ mm}} > 2'000 \text{ mm} = L_b \rightarrow \text{OK}$$

Method EP:  $L_{cr} = 2.7 \cdot i_z \left( 1 - 0.5 \Psi \right) \left( \frac{E}{f_y} \right)^{0.8}$

$$= \underline{2'943 \text{ mm}} > 2'000 \text{ mm} = L_b \rightarrow \text{OK}$$

2) Condition à vérifier:  $\omega \leq \frac{l}{300} = \frac{8'000}{300} = 26.7 \text{ mm}$  [Voir Annexe J]

Cas de charge quasi-permanent:  $E_d = E \{G_k; \Psi_2 Q_k\}$ ;  $\Psi_2 = 1 - \frac{1000}{h}$  [neige]

$$\begin{aligned} G_{ed} + Q_{ed} &= 1.25 \cdot l \cdot (g_k + \Psi_2 \cdot q_k) \\ &= 1.25 \cdot 6 \cdot (10 + (1 - \frac{1000}{2000}) \cdot 25) \\ &= 168.75 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$(g + q)_{eq} = \frac{E (G_{ed} + Q_{ed})}{L} = \frac{675}{8} = 84.375 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} \text{Fläche: } \omega &= \frac{5}{384} \cdot \frac{q L^4}{E I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{84.375 \cdot 8'000^4}{210'000 \cdot 1'367 \times 10^6} \\ &= 15.675 \text{ mm} \ll 26.7 \text{ mm} \rightarrow \text{OK.} \end{aligned} \quad [\text{S2S CS, p.40}]$$

3) En considérant les frotteurs propres, on a, en prenant l'hypothèse des 5% pour le frottement propre des pannes,  $G_{ed} + Q_{ed} = 420 + 1,25 \cdot 6 \cdot 8g \cdot 0,05 \cdot 10 = \underline{425,1 \text{ kN}}$

On obtient une charge équivalente  $q_{eq} = \frac{G_{ed} + Q_{ed}}{L} = \underline{212,5 \text{ kN/m}}$

En considérant le frottement propre de la traverse, on obtient  $q_{ed} = q_{eq} + 1,35 \cdot 2,0 = \underline{215,2 \text{ kN/m}}$

On obtient ainsi pour les efforts en section:  $M_{ed} = \frac{q^l^2}{8} = \underline{1721,6 \text{ kN/m}} \leq M_{rd}$

$$V_{ed} = \frac{q^l}{2} = \underline{861 \text{ kN/m}} \leq \frac{1}{2} V_{rd}$$

La différence est de  $\frac{1721,6}{1680} = \underline{2,5\%}$  pour les moments et de  $\frac{861}{630} = \underline{37\%}$

pour l'effort tranchant. Comme la valeur du moment change peu, les longueurs critiques de déversement sont également vérifiées.

Remarque : La différence des efforts tranchants est significative. Ceci est principalement dû au fait que 2 des charges concentrées ( $G+Q)/2$ ) sont en réalité transmises directement aux appuis (voir question 1).