

Cours structures en métal

TGC 10, chapitre 5:

Dimensionnement de poutres, partie 1

Fig. 5.1: Types de poutres

Profilé laminé

$$h/L = \\frac{1}{15} \\text{ à } \\frac{1}{30}$$

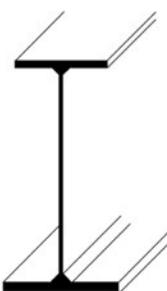


Profilé avec semelles de renfort



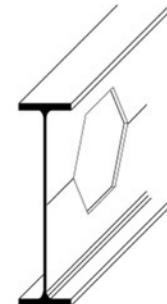
Poutre composée à âme pleine

$$h/L = \\frac{1}{7} \\text{ à } \\frac{1}{35}$$

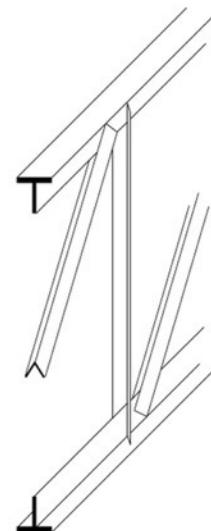


Poutre ajourée

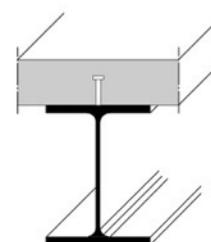
$$h/L = \\frac{1}{20} \\text{ à } \\frac{1}{30}$$



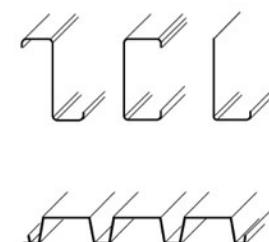
Poutre à treillis



Poutre mixte acier-béton



Elément à parois minces



Notion d'élancement h/L (ou l'inverse)

Profilés laminés en double-té



Petit immeuble mmk en construction, Lonay



IPE
(poutres)



HHD
(colonnes)

Profilés laminés en double-té, profilés les plus utilisés



Bâtiment en construction, Rolex, Genève

Prof. A. Nussbaumer

4

EPFL

Peu d'encombrement et de poteaux



Bâtiment à Belmont, photo O. Burdet, 2017

Prof. A. Nussbaumer

Poutres composées à âme pleine, si haut. variable, grande portée ...



Halle de sport de Buchholz

Poutres composées à âme pleine, la règle pour les ponts

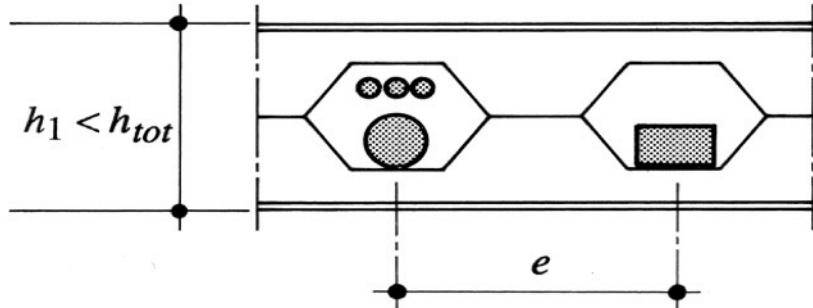


Viaduc des Vaux, Estavayer

Fig. 5.21: Poutres ajourées

Découpe puis resoudage:

- augmentation hauteur statique et donc inertie sans augmenter le poids

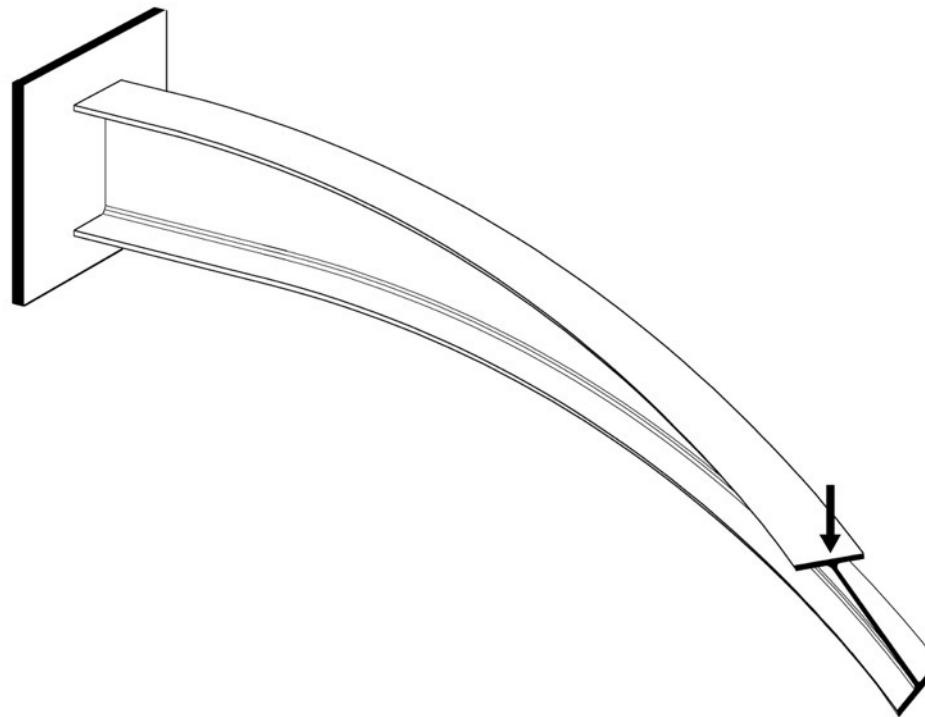


Whitehall Road, Leeds UK

Analyse structurale et dimensionnement de poutres (& poutre-poteau):
Qu'est-ce qui change par rapport à vos connaissances de statique ?

1. La détermination des efforts intérieurs : peut être élastique ou plastique
2. Considérer le phénomène de voilement : l'éviter en vérifiant ou choisissant des épaisseurs de plaques sur la base de leur élancement b/t qui respectent des limites (fonction de la rotation nécessaire pour atteindre un moment résistant)
3. Considérer le phénomène de déversement: l'éviter en vérifiant ou choisissant des longueurs entre appuis latéraux qui respectent des limites (fonction de la rotation nécessaire pour atteindre un moment résistant)

Fig. 11.1 : Cas d'une poutre console chargée à son extrémité



Déversement d'une poutre sous son propre poids lors transport

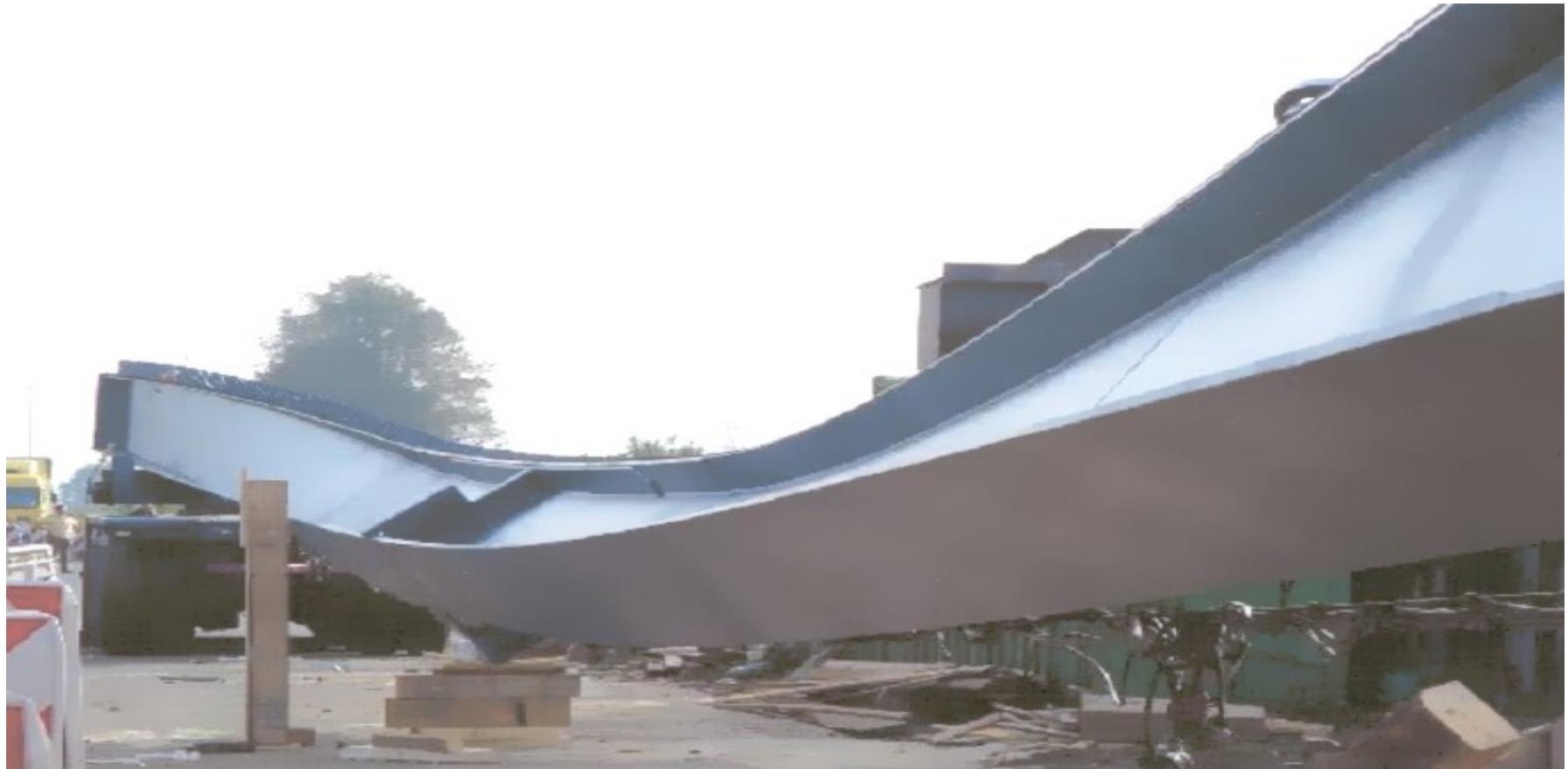
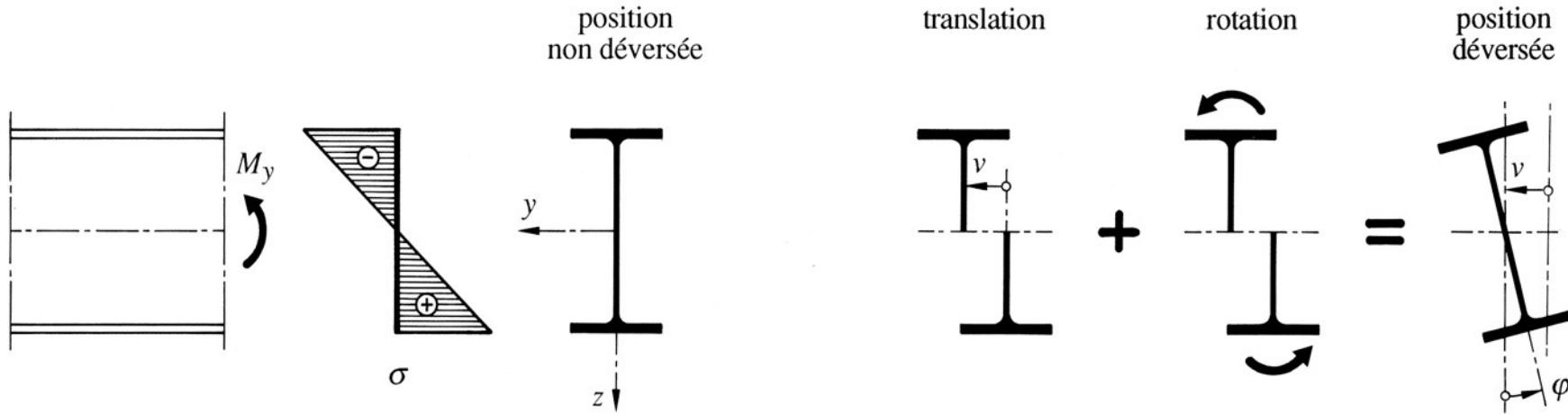


Fig. 11.3: décomposition du mouvement d'une poutre sujette au déversement

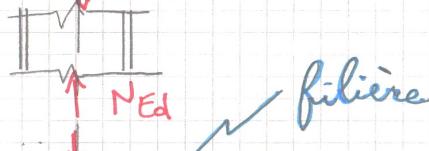


ELU: Analogie entre compression et flexion

Compression

$$N_{Ed}$$

Section



$$N_{pl} = f_y \cdot A$$

Élément



classe
section

$$N_{Rk}$$

voilement flambage

$$M_{Ed}$$

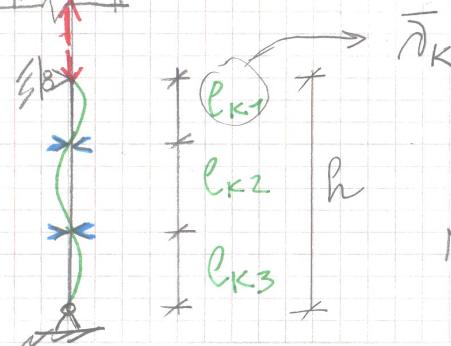
élévation

$$I$$

$$N_k = \chi_k \cdot N_{classe}$$

$$\chi_k = 1 \text{ si } \bar{\lambda}_k \leq 0,2 \\ (\text{flambage empêché})$$

Modèle
statique



Vérification:

$$N_{Ed} \leq \frac{N_k}{\gamma_m}$$

Flexion



$$M_{pe} = f_y \cdot W_{pl}$$

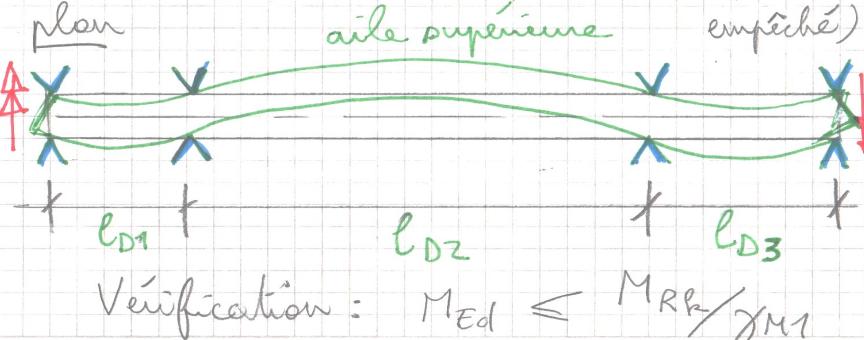
$$l_{D1}$$



$$I$$

M_{Rk} ? 1) voilement - classe section
2) $M_{Rk} = M_{classe}$

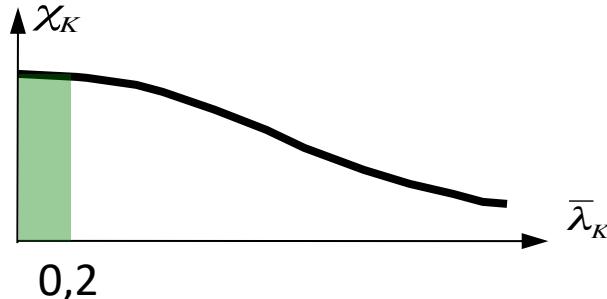
si $l_{D1} \leq l_{CR}$ (dévers.
aire supérieure empêché)



Vérification: $M_{Ed} \leq M_{Rk} / \gamma_m$

ELU: Analogie entre compression et flexion

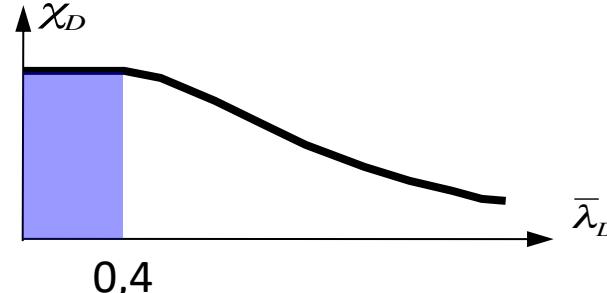
Flambage :



Flambage
empêché

Note: assouplissement critère (TGC10,
pratique) pour considérer empêché
selon axe faible (I_z) à $\bar{\lambda}_{kz} \leq 0,5$

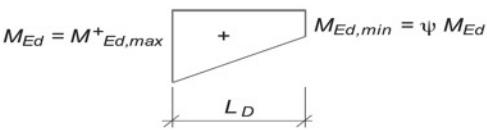
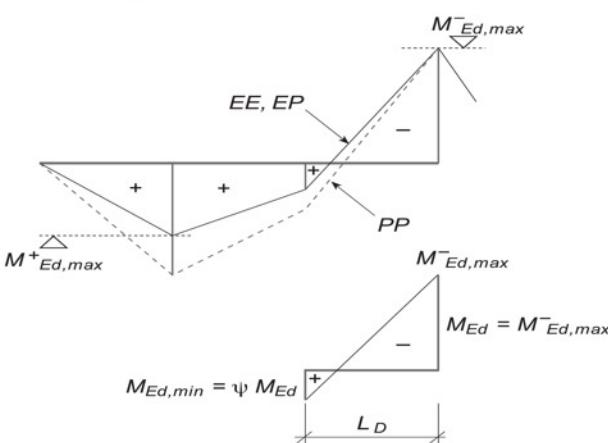
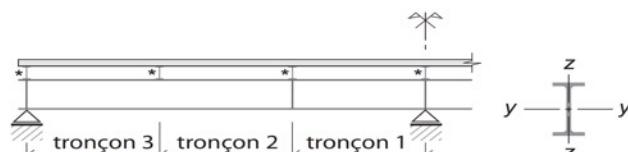
Déversement:



Déversement empêché

$$L_D \leq L_{cr} \quad \text{et} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,15$$

ELU: Longueur critique de déversement (SIA 263, tab. 6) METHODE GENERALE



Méthode PP

Pour tous les tronçons avec rotule plastique aux extrémités, la condition suivante doit être remplie: $L_D \leq L_{cr}$

Longueur critique de déversement pour la méthode PP	$-1 \leq \psi \leq 0,5$	$\psi \geq 0,5$
---	-------------------------	-----------------

En général: $L_{cr} = 2,0 i_z (1 - 2\psi/3) (E/f_y)^{0,5}$ $1,35 i_z (E/f_y)^{0,5}$

Exemple: tronçon 1 $|M_{Ed,max}^-| \leq M_{pl}/\gamma_{M1}$
tronçon 2,3 $|M_{Ed,max}^+| \leq M_{pl}/\gamma_{M1}$

Méthode EP

- La vérification au déversement n'est pas nécessaire pour les tronçons d'une longueur L_D qui remplissent la condition suivante: $L_D \leq L_{cr}$

Longueur critique de déversement pour la méthode EP	$-1 \leq \psi \leq 1$
---	-----------------------

En général: $L_{cr} = 2,7 i_z (1 - 0,5\psi) \sqrt{E/f_y}$

- Pour les tronçons où $L_D > L_{cr}$, la vérification au déversement doit être effectuée selon le chiffre 4.5.2.

Méthode EE

- La vérification au déversement n'est pas nécessaire si la longueur L_D d'un tronçon remplit la condition suivante:

$$L_D \leq 1,1 L_{cr}$$

où L_{cr} est calculé avec méthode EP

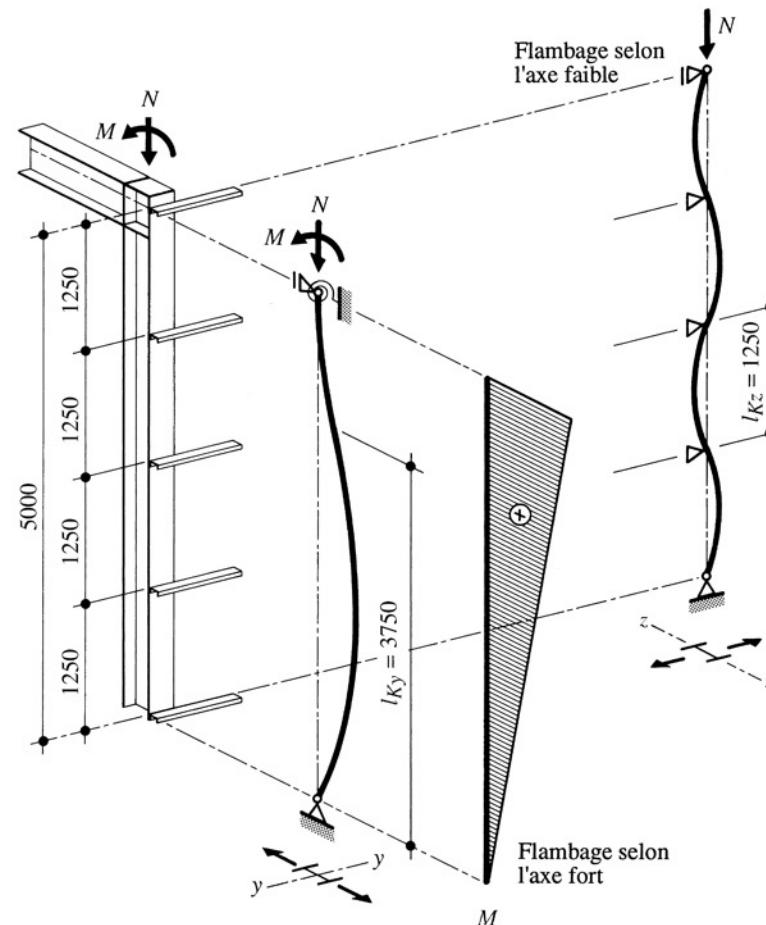
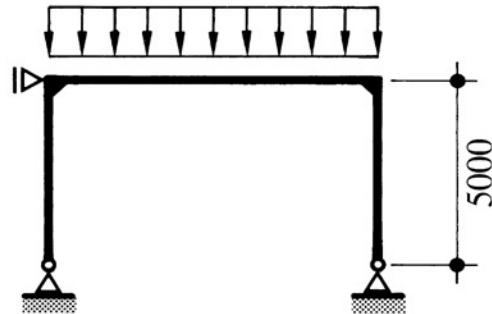
- Pour les tronçons où $L_D > 1,1 L_{cr}$, une vérification au déversement doit être effectuée selon le chiffre 4.5.2.

Vérification:

$$L_D \leq L_{cr}$$

Revenons à notre Exemple 6.2 (poutre-poteau), Fig. 6.9

Système statique



- Déversement empêché ?
- Calcul de L_{cr}
- Condition: $N_{Ed}/N_{Rd} = 310/(2290/1.05) = 0.142$
 - $N_{Ed}/N_{Rd} \leq 0.15$ OK
- (calcul EP) $L_{cr} = 2,7 i_z (1 - 0,5 \psi) \sqrt{E/f_y} = 5650 \text{ mm}$
- $L_D \leq L_{cr}$?
- $5000 \leq 5650$ OK
- Donc déversement empêché (ne se produit pas)

Dimensionnement d'une poutre

- Définir les dimensions, sous les actions qui la sollicite:
 - Assurant une sécurité suffisante
 - Assurant un bon comportement en service
 - Prévoyant une bonne durabilité
- Vérifier toutes les sections de la poutre:
 - Sur appui, en général sous $M+V$
 - En travée
 - Sections intermédiaires (aux charges concentrées)

Prédimensionnement d'éléments (bâtiments)

De l'expérience, du TGC 11 § 3.2.3, § 5.3.3 et annexe chap. 6: règles empiriques de prédimensionnement d'éléments

Elancements:

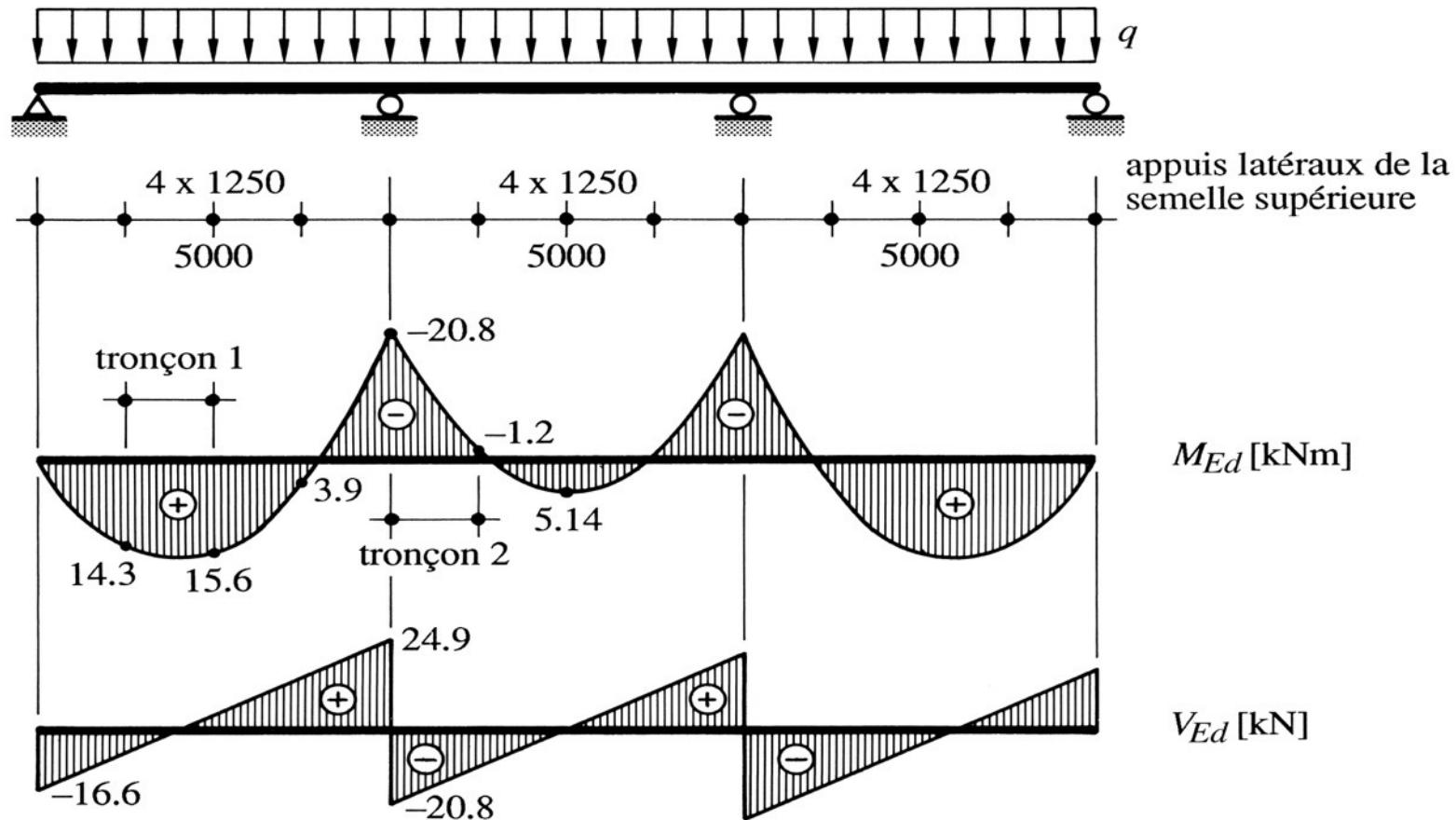
- Dalle mixte avec tôle profilée: $d \cong \ell/32$ (d : hauteur statique)
- Solive en profilé laminé (IPE): $h \cong \ell/30$ ($\ell/33$) (h : hauteur statique)
- Sommier en profilé laminé (IPE ou HEA): $h \cong \ell/20$ à $\ell/25$ ($\ell/30$)
- Poteau en profilé laminé: profilé HE d'élancement $\lambda_k \leq 50$
- CV, treillis de faible élancement, si possible: $h \cong \ell/5$ à $h \cong \ell/8$ (ℓ : portée horizontale ou verticale)

Cadres, portées et écartements:

- Compromis entre adaptabilité (grandes portées) et économie (petites portées)
- Portées sommiers: typiquement entre 6 et 15 m (profilés courants), mais possible jusqu'à 30 m
- Ecartement sommiers (= Portées solives): typiqu. entre 6 et 9 m, mais possible jusqu'à 12 à 15 m (poutres à treillis)
- Portées pannes: typiquement entre 6 et 9 m
- Entraxe des pannes: de 1 m (plaques ondulées en fibrociment sans sous-structure) à 4 m (tôles profilées)

Dimensionnement d'une poutre

Fig. 5.11 : Exemple 5.1, répartition élastique des efforts intérieurs



Démarche générale de dimensionnement

1. Séparer la structure en sous-systèmes à dimensionner séparément (au moins dans un premier temps, ce cours). Système statique du sous-système.
2. Définir les charges. Détermination des efforts intérieurs.
3. Décider du type d'élément <-> effort principal:
 - Tirant ou poteau $\rightarrow N_{Ed}$
 - Poutre $\rightarrow M_{Ed}$
4. Prédimensionner, choisir le type de section (aussi en fonction effort principal)
 - Poteau: soit avec A (en section), soit mieux avec $50 < \lambda_k < 100$
 - Poutre: h/L . Pour profilés laminés, mixte 1/15 à 1/30, pour composés soudés 1/7 à 1/35 (pour dalles 1/40 à 1/50)

Et dimensionner (1^{ère} itération), en général sous effort principal, l'un des cas de charge déterminants et à l'ELU

Exemple 5.1, méthode de dimensionnement plastique-plastique

2) Détermination des efforts intérieurs plastiques

3) Sollicitation principale ? Moment sous $g + q$

4) Dimensionnement, 1^{ère} itération

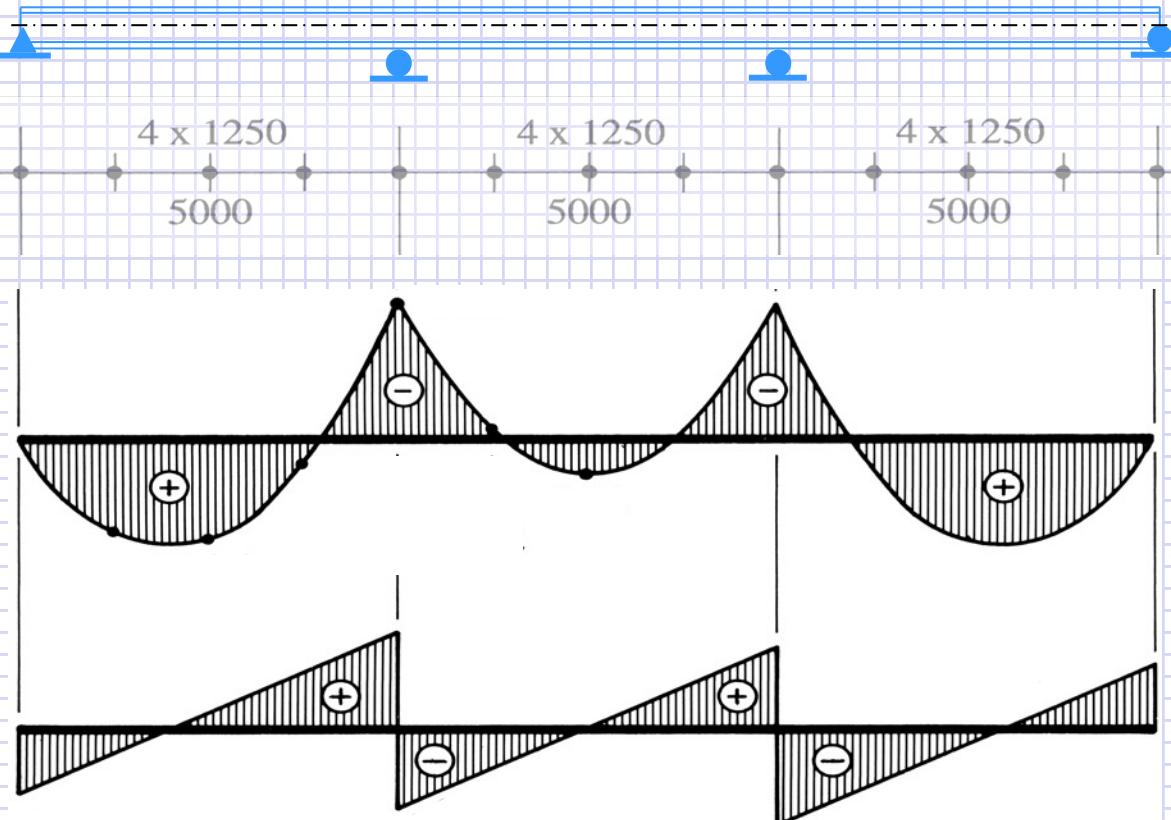
La résistance à la flexion est fonction de:

- f_y

- type de profilé, soit :

- W_{el} ou W_{pl} et méthode de calcul (EE, EP , PP)
- critères d' élancement pour éviter le voilement
- h ou élancement (h/L)
- limitation en hauteur de construction
- possibilités/restrictions pour les assemblages

Dimensionnement en flexion



Plastische Schnittkraftberechnung
Calcul plastique des efforts intérieurs

Durchlaufträger mit konstantem Querschnitt / Poutres continues de section constante

		Endfeld travée de rive	Innenfeld travée intermédiaire	
	M_{pl}	M_{pl}	M_{pl}	
1	$M_{pl,req}$	Grenzlast <i>charge ultime</i>	$M_{pl,req}$	Grenzlast <i>charge ultime</i>
	$q \cdot l^2 / 11,66$	$11,66 \cdot M_{pl} / l^2$	$q \cdot l^2 / 16$	$16 \cdot M_{pl} / l^2$
	$a = 0,586 l$		$a = 0,5 l$	
2	$F \cdot l / 6$	$6 \cdot M_{pl} / l$	$F \cdot l / 8$	$8 \cdot M_{pl} / l$
	$a = 0,5 \cdot l$			
3	$F \cdot l / 4$	$4 \cdot M_{pl} / l$	$F \cdot l / 6$	$6 \cdot M_{pl} / l$
	$a = l / 3$		$l / 3 \leq a \leq 2 l / 3$	

Dimensionnement en flexion (2)

5) ELU: Contrôle critères d'élancement pour éviter le voilement

Méthode pour profilés double-té:
 Utilisation table Szs C5
 Sinon SIA 263, Tab. 5a et 5b

HEA 120, S235, Ok pour calcul PP,
 i.e. profilé de classe 1

HEA	Breitflanschträger HEA	Profilés à larges ailes HEA
	$A_y = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$ $A_w = b \cdot d$ $S_y = \frac{1}{2} W_{ply}$ $S_z = \frac{1}{2} W_{plz}$	Maximale Lagerlängen / <i>Longueurs maximales en stock:</i> $h \leq 180$ 18 m $h \geq 200$ 24 m
	$W_{aly} = \frac{I_y}{h/2}$ $\bar{W}_y = \frac{I_y}{(h-t_f)/2}$ $W_{alz} = \frac{I_z}{b/2}$	EURONORM 53 – 62, DIN 1025/3
		Andere Bezeichnungen } DIE, IPBl <i>Autres désignations</i>
		Critères d'élancement selon SIA 263 pour ce profilé en acier S355 en flexion simple ($n = 0$) non remplies pour: <input type="radio"/> méthode PP <input checked="" type="radio"/> méthode EP * Auch In S355J0 oder S355J2G3 ab Schweizer Lager erhältlich.

* Livrable en S355J0 ou S355J2G3 du stock suisse.

HEA	m kg/m	Statische Werte / Valeurs statiques												
		A mm ²	A _y mm ²	A _w mm ²	I _y mm ⁴	W _{aly} mm ³	W̄ _y mm ³	W _{ply} mm ³	I _y mm	I _z mm ⁴	W _{alz} mm ³	W _{plz} mm ³	I _z mm	K = I _x mm ⁶
100*	16,7	2120	756	440	3,49	73	79	83	40,6	1,34	26,8	41,2	25,1	0,0520
120*	19,9	2530	946	530	6,06	106	114	119	48,9	2,31	38,5	58,9	30,2	0,0596
140*	24,7	3140	1012	685	10,3	155	166	173	57,3	3,89	55,6	84,7	35,2	0,0803
160*	30,4	3880	1221	858	16,7	220	234	246	65,7	6,16	76,9	118	39,8	0,118
180*	35,5	4630	1447	969	25,1	294	311	324	74,5	9,25	103	157	45,2	0,147
200*	42,2	5390	1808	1170	36,9	389	410	430	82,8	13,4	134	204	49,8	0,204
220*	50,5	6430	2067	1290	54,1	515	544	568	91,7	19,5	178	271	55,1	0,281
240*	60,3	7690	2518	1640	77,6	675	712	744	101	27,7	231	352	60,0	0,410
260*	68,2	8690	2876	1780	104,5	836	881	920	110	36,7	282	430	65,0	0,520
280*	76,4	9730	3174	2060	136,7	1010	1060	1110	119	47,6	340	518	70,0	0,614
300*	88,3	11300	3728	2350	182,6	1260	1320	1380	127	63,1	421	642	74,9	0,842
320*	97,6	12400	4113	2650	229,3	1498	1560	1630	136	69,9	468	710	74,9	1,09
340*	105	13300	4495	2980	276,9	1880	1770	1850	144	74,4	496	756	74,6	1,29
360*	112	14300	4896	3320	330,9	1890	1990	2080	152	78,9	526	803	74,3	1,51
400*	125	15900	5733	4080	450,7	2310	2430	2580	168	85,6	571	873	73,4	1,91
450	140	17800	6578	4820	637,2	2900	3040	3220	189	94,7	631	966	72,9	2,49
500	155	19800	7472	5600	869,7	3560	3730	3940	210	103,7	691	1060	72,4	3,18
550	166	21200	8372	6450	1119	4150	4340	4620	230	108,2	721	1110	71,5	3,61
600	178	22600	9221	7240	1412	4790	5000	5280	250	112,7	751	1160	70,5	4,08
650	190	24200	10320	8290	1752	5470	5710	6140	269	117,2	782	1200	69,7	4,59
700	204	26000	11700	9610	2153	6240	6490	7040	288	121,8	812	1280	68,4	5,23
800	224	28600	13890	11400	3034	7680	7960	8700	326	126,4	843	1310	66,5	6,10
900	252	32100	16330	13800	4221	9480	9820	10600	363	135,5	903	1420	66,0	7,51
1000	272	34700	19460	15800	5538	11190	11550	12800	400	140,0	934	1470	63,5	8,37

6) Vérification en tenant compte du poids propre

7) Vérification au déversement, $L_D = 1250 \text{ mm} \leq L_{cr}$

Tronçon	$M_{ed,min} [\text{kNm}]$	$M_{ed,max} [\text{kNm}]$	Ψ	$L_{cr} [\text{mm}]$
1	≈ 18.4	≈ 18.4	1	$1219 \approx \text{OK}$
2	1.76	-18.4	-0.1	1926 OK

$$L_{cr1} = 1.35 \cdot i_z \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1.35 \cdot 30.2 \sqrt{\frac{210000}{235}} = 1219 \text{ mm}$$

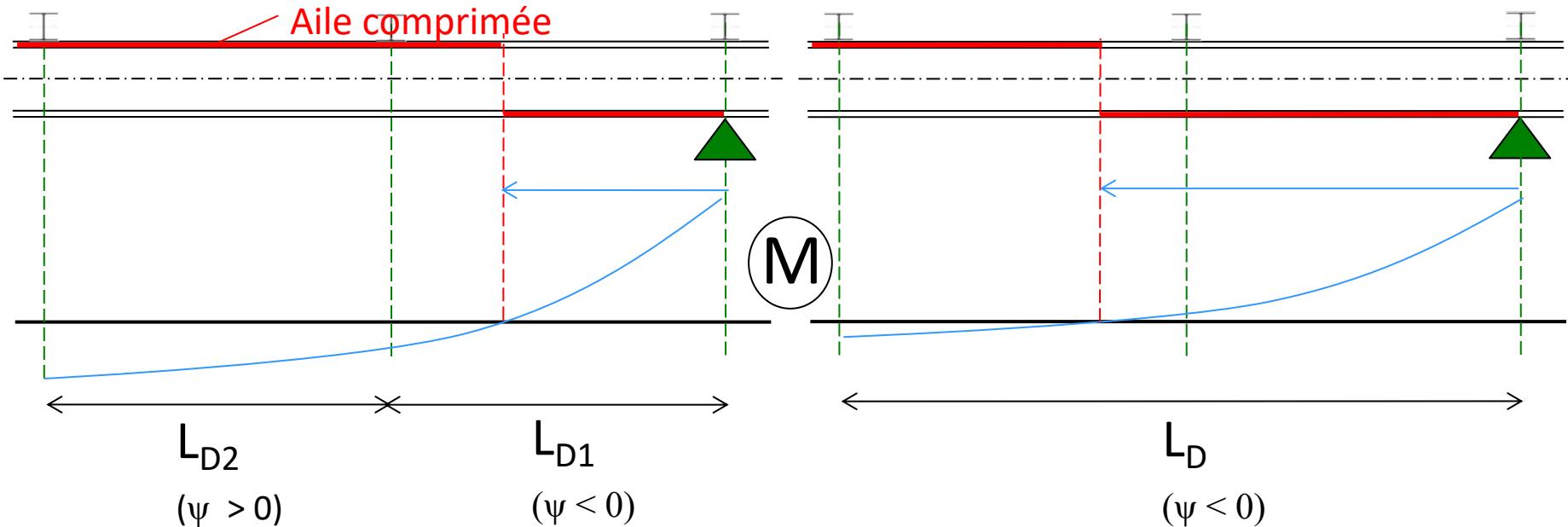
$$L_{cr1} = 2 \cdot i_z \cdot (1 - 2\psi/3) \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1926 \text{ mm}$$

ITERATIONS SI NECESSAIRE

Cas possibles déversement (aile non-tenue directement) (1)

Changement de signe de moment
avant l'appui latéral suivant
Support latéraux (aile sup. tenue directement, ponctuellement)

Changement de signe de moment
après l'appui latéral suivant



Cas possibles déversement (aile non-tenue directement) (2)

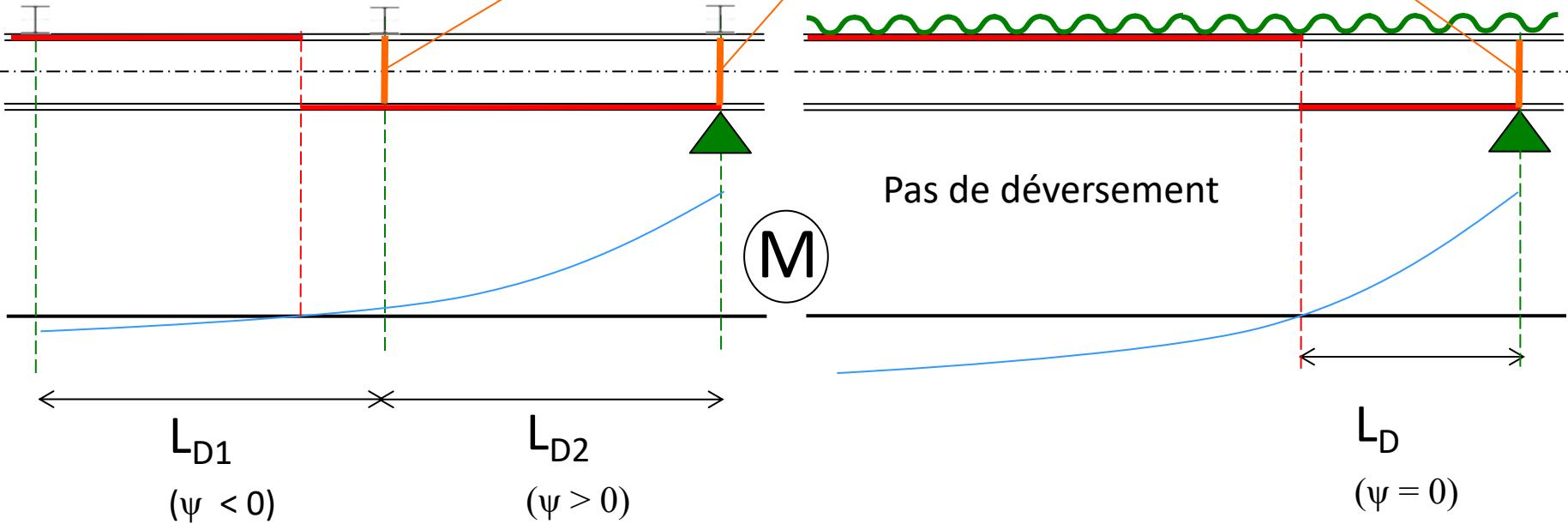
Changement de signe de moment après
l'appui lat. suivant, mais raidisseurs

Support latéraux ponctuels

Raidisseurs

Raidisseurs d'appuis (en général)

Support latéral aile sup. continu (tôle)



$$L_{D1}$$

$$(\psi < 0)$$

$$L_{D2}$$

$$(\psi > 0)$$

$$L_D$$

$$(\psi = 0)$$

8) Vérifications de la poutre aux autres ELU (ou ELS d'abord, selon le jugement de l'ingénieur)

- Effort tranchant
- Interaction moment-effort tranchant
- Autres interactions
- **Autres cas de charges**
- Introduction d'efforts concentrés
- Assemblages
- ...

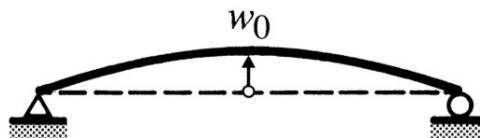
ITERATIONS SI NECESSAIRE

9) Vérifications aux ELS, en particulier la flèche

La flèche totale d'une poutre :

- 1) contreflèche w_0 à l'usine
- 2) flèche w_1 (poids propre et valeur instantanée des actions permanentes)
et w_2 flèche des effets à long terme, différés
- 3) w_{3j} flèches dues aux actions variables, selon la durée d'application
(j fait référence à 0: rare, 1: fréquent, 2: quasi permanent)

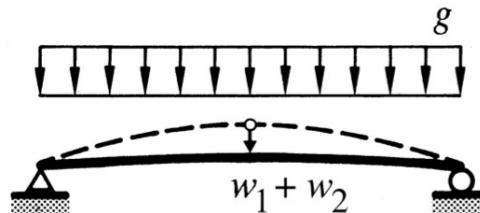
Etat initial



$$w_{tot} =$$

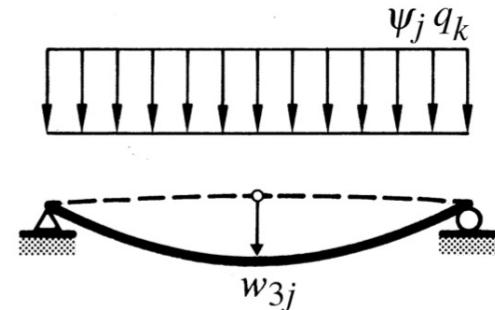
$$w_0$$

Poids propre et actions permanentes



$$5gL^4/384EI + w_2$$

Action variable



$$(\psi_j q_j) 5L^4/384EI$$

9) Vérifications aux ELS:

table Szs C4, p. 164. Calcul de la flèche d'une poutre

Sous charge concentrée, flèche au point M:

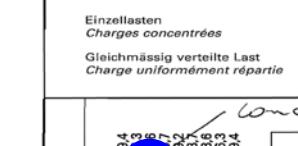
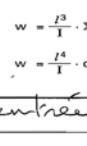
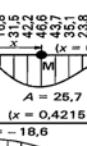
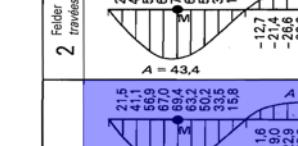
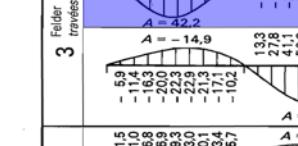
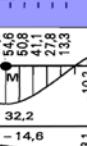
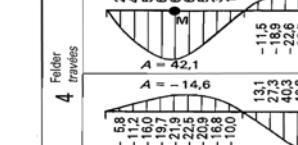
$$w_M \text{ [mm]} = \frac{L^3 \text{ [m}^3\text{]}}{I \text{ [mm}^4\text{]}} \cdot Q \text{ [N]} \cdot k$$

Sous charges concentrées, w au point M:

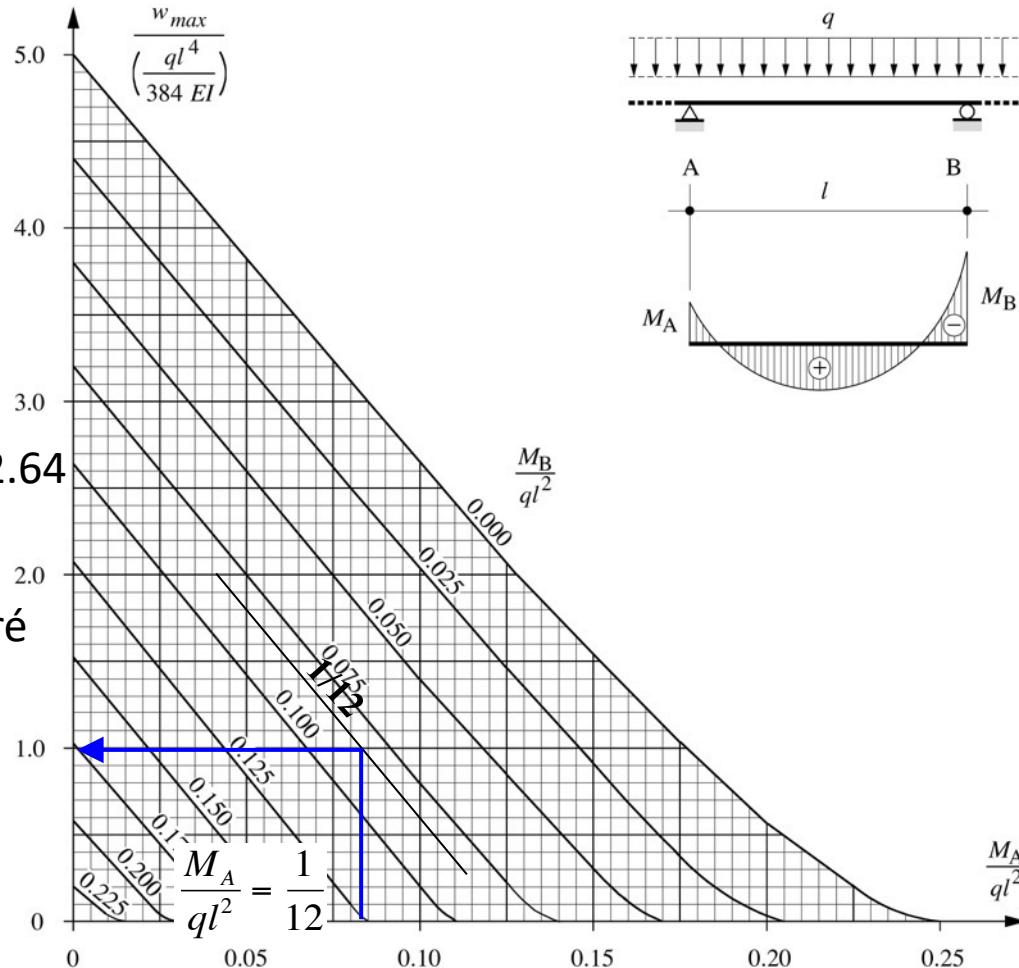
$$w_M \text{ [mm]} = \frac{L^3 \text{ [m}^3\text{]}}{I \text{ [mm}^4\text{]}} \cdot \sum Q_i \text{ [N]} \cdot k_i$$

Sous charge répartie, w au point M:

$$w_M \text{ [mm]} = \frac{L^4 \text{ [m}^4\text{]}}{I \text{ [mm}^4\text{]}} \cdot q \text{ [N / m]} \cdot A$$

Einflusslinien der Durchbiegungen im Punkt M für I = konstant Lignes d'influence des flèches au point M pour I = constante		
Einzellasten Charges concentrées	$w = \frac{l^3}{I} \cdot \sum Q_i \cdot k$	$I = [\text{m}], \text{const.}$ $w = [\text{mm}]$ $I = [\text{mm}^4], \text{const.}$ $Q_i = [\text{N}/\text{m}]$ $Q = [\text{N}]$ $E = 210 \text{ kN/mm}^2$
Gleichmässig verteilte Last Charge uniformément répartie	$w = \frac{l^4}{I} \cdot q \cdot A$	Reprise Belastungsfall Cas de charge
Felder travées		ΣA
1		 62,0
2		 25,7
3		 12,4
4		 43,4
∞		 24,8
		Reprise Belastungsfall Cas de charge
		ΣA
		32,2
		32,2
		2,5
		46,1
		30,1
		35,4
		8,9
		37,2
		12,4

ELS: Fig. 5.4: diagramme pour le calcul de la flèche d'une poutre



Notre cas: 2.64

Exemple, cas biencastré

$$w_{max} = \frac{1}{384} \frac{ql^4}{EI}$$

9) Vérifications aux ELS

- Fissuration
- Vibrations: voir TGC 10 § 5.2.1 et TGC 11 § 10.6
 - fréquences désagréables aux utilisateurs
 - phénomène de mise en résonance ($f_{crit} = f_{propre}$ ou un multiple)

$$f_{propre,i} [Hz] = \frac{\alpha_i^2}{2\pi \cdot L^2 [m^2]} \cdot \sqrt{\frac{EI [Nm^2]}{m [kg/m]}}$$

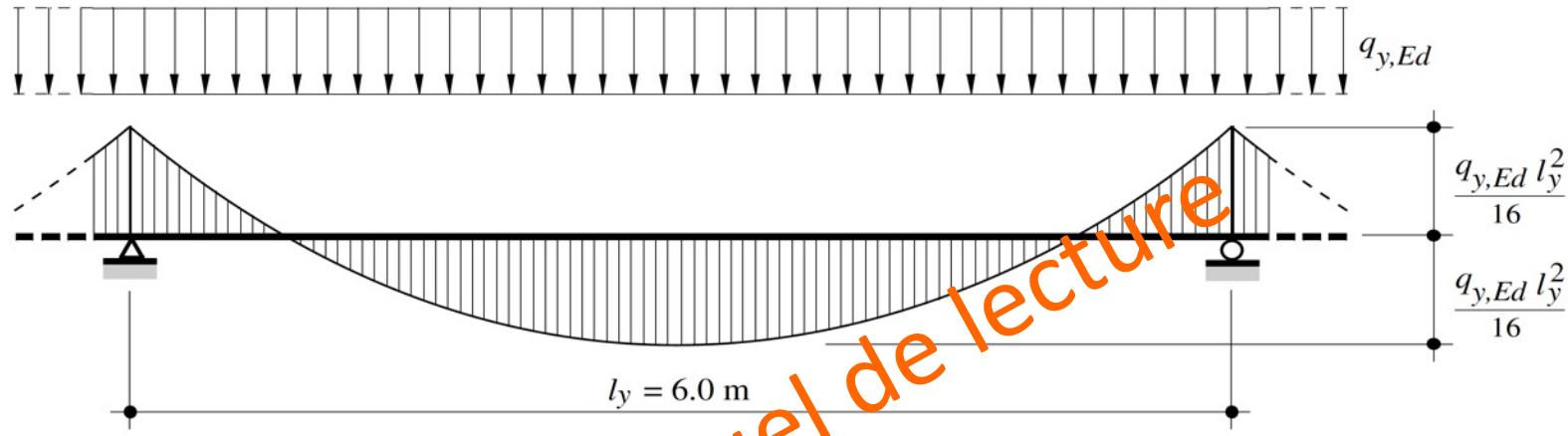
Fréquences propres à éviter (marche $\cong 2$ Hz): $f_{propre} = 1.6$ à 2.4 Hz et 3.5 à 4.5 Hz

Donc il faut avoir (passerelles):

- verticalement: $f_{propre} < 1.6$ Hz ou $2.4 < f_{propre} < 3.5$ Hz
ou $f_{propre} > 4.5$ Hz
- horizontalement (longitudinalement): $f_{propre} > 2.5$ Hz
- horizontalement (transversalement): $f_{propre} > 1.3$ Hz

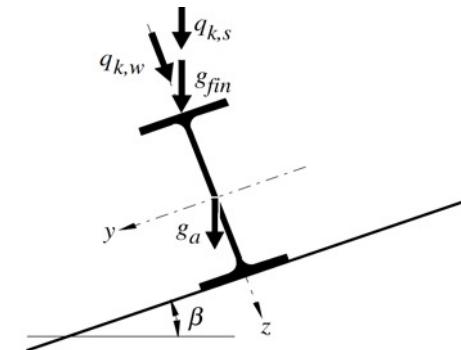
ITERATIONS
SI NECESSAIRE





(a) Selon l'axe fort

Travail individuel de lecture

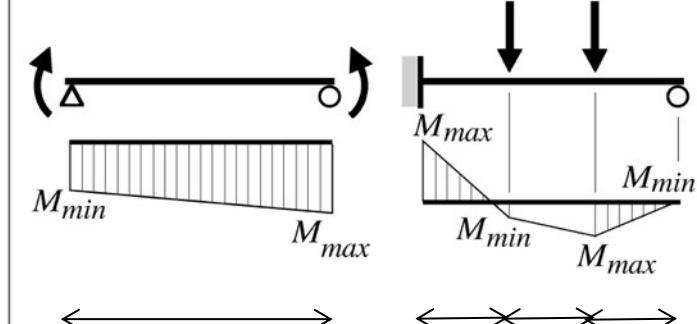




Annexe:

Tab. 5.8: expression simplifiée de la long. critique de déversement

Nuance d'acier	$\Psi = -1.0$			$\Psi = 0$			$\Psi = +1.0$		
	PP	EP	EE	PP	EP	EE	PP	EP	EE
S235	99.6	121	133.2	59.8	80.7	88.8	40.4	40.4	44.4
S275	92.1	112	123.1	55.3	74.6	82.1	37.3	37.3	41.0
S355	81.1	98.5	108.4	48.6	65.7	72.2	32.8	32.8	36.1
S460	71.2	86.5	95.2	42.7	57.7	63.5	28.8	28.8	31.7



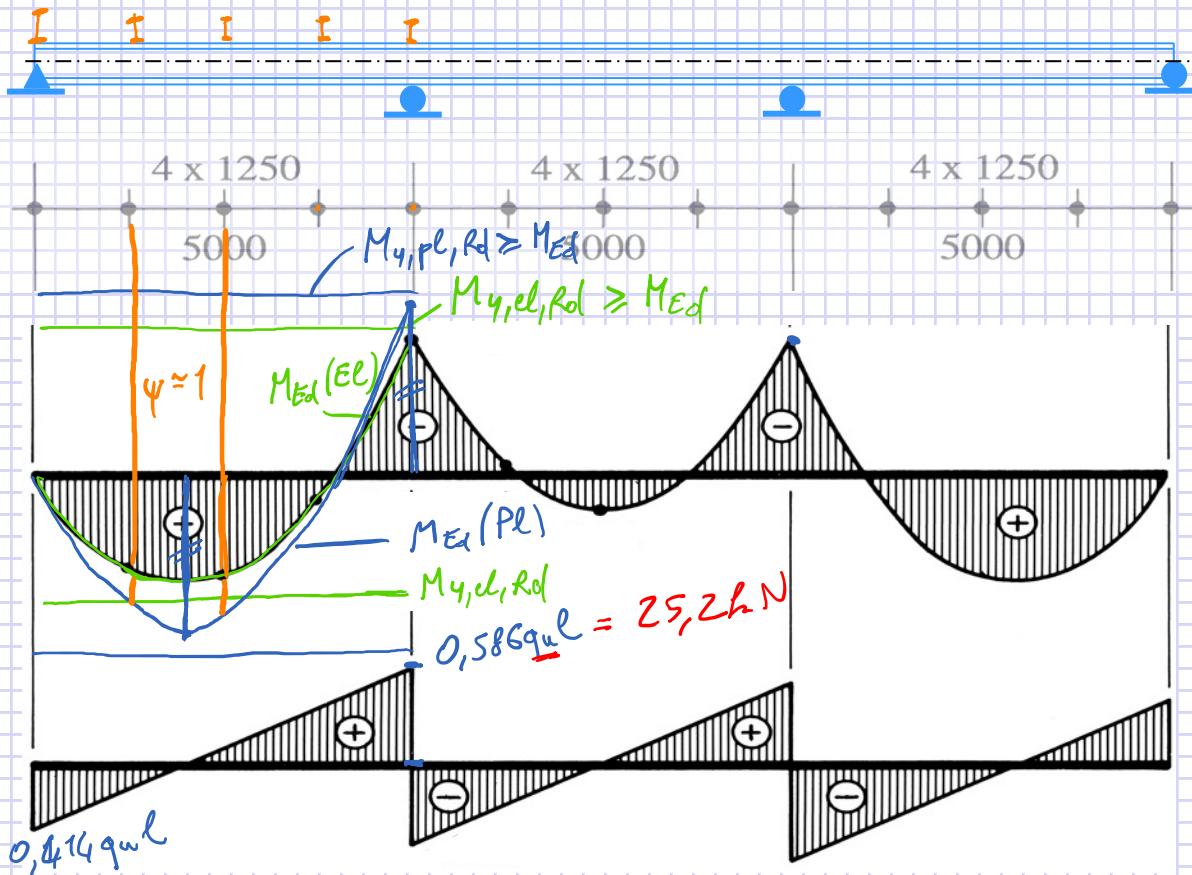
L_D

$L_{D1} \ L_{D2} \ L_{D3}$

L_{cr} augmente lorsque diag. $M \neq cst$

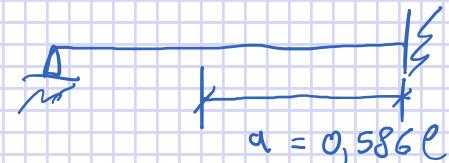
$$L_{cr} = x \cdot i_z$$

Dimensionnement en flexion



Distr. plastique :

$$q_{u,wire} = 11,66 \frac{M_{pl}}{l^2}$$



$$R_A = 0,414 q_u \cdot l$$

$$R_B = 0,586 q_u l$$

$$R_B = (0,586 + 0,5) q_u l$$

$$q_{Ed} = \gamma_Q \cdot q_k = 8,3 kN/mm$$

Dimensionnement en flexion (2)

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed,tot} \cdot l^2}{11,66} = 18,4 \text{ kNm} \quad (\text{estim. p.p.})$$

$$q_{Ed,tot} = \underbrace{\gamma_G \cdot g_b + \gamma_Q \cdot q_b}_{\text{P.P.}} = \underbrace{\gamma_G \cdot g_b}_{0,3} + 8,3 \quad \sim 50\%$$

$$M_{Ed} \leq M_{y,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{y,pl}}{\gamma_M}$$

$$W_{y,pl} \geq \frac{M_{Ed} \cdot \gamma_M}{f_y} = 82 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

S 235

$$\text{IPE 140} \quad W_{y,pl} = 88,3 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \quad i_z = 16,5 \text{ mm}$$

$$\text{HEA 120} \quad W_{y,pl} = 119 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \quad i_z = 30,5 \text{ mm}$$

classe 1? S235 oui (flexion simple)

2 méthodes: a) sans p.p.
→ contrôle avec.

b) estim. p.p.
(S à 10%)
L↑

portée 5 mm

$$\frac{h}{l} = \frac{1}{25}$$

$$\rightarrow h \approx 200 \text{ mm}$$