

# **Flambage**

## **Série 5**

Prof. Alain Nussbaumer

**Greta Murtas**

▪ **CIVIL235 - Structures en métal**

- I. Rappel étapes dimensionnement
- II. Flambage
  - I. Cas possibles
  - II. Étapes de calcul du cas 1
    - I. Calcul élancement au flambage
    - II. Calcul élancement limite élastique
    - III. Calcul du coefficient d'élancement
    - IV. Choisir type de courbe
    - V. Calculer le coefficient de réduction de flambage
    - VI. Vérification finale
    - VII. Raccourcis avec tables
  - III. Étapes de calcul du cas 2

# EPFL Etapes dimensionnement et vérification

1. Choisir/respecter la classes de section
2. Vérifier classe de section choisie/donnée (Élancement)
3. SIA 263 Tableau 7:
  - a. Vérification résistance en section
    - i.  $N+M_y$  et  $N+M_z$
    - ii.  $V+M_y$  ou  $V+M_z$
    - iii.  $N+M_y+M_z$
    - iv. Tous les efforts:  $N + V_z + V_y + M_y + M_z$
  - b. Introduction, vérification stabilité
    - i. **Flambage (cas 1)**
    - ii. Déversement (*prochainement*)

# Flambage: vérification selon effort

CAS POSSIBLES	Articles NORME SIA 263	EXERCICES
N Vérification selon axe fort (Y) Vérification selon axe faible (Z)	4.5.1.3	TGC 10 exercice 6.1
N + My et <u>flambage hors plan empêché</u> et déversement empêché	5.1.9 avec $M_{rd} = M_{y,rd}$	TGC 10 exercice 6.2
N + Mz et <u>flambage hors plan empêché</u> et déversement empêché	5.1.9 avec $M_{rd} = M_{z,rd}$	
N + My et flambage hors plan empêché et <u>déversement</u>	5.1.9 avec $M_{rd} = M_{D,rd}$	TGC 10 exercice 6.3
N + My + Mz et <u>flambage hors plan pas empêché et déversement</u>	5.1.10	

# Stabilité – Vérification au Flambage – Cas1: N

## Objectif:

Vérifier  $N_{ed} < N_{K,Rd} = \frac{\chi_K f_y A}{\gamma_{M1}}$

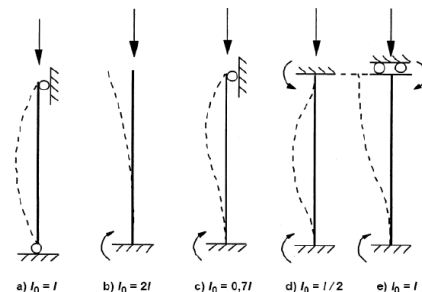
### Deux vérifications

- 1) Flambage selon Axe de forte inertie (Y)
- 2) Flambage selon Axe de faible inertie (Z)

## Méthode

### 1) Trouver $L_K$ ( $I_0$ dans la figure) selon conditions d'appuis

- Attention à bien considérer la longueur de flambage  $L_K$  selon les deux axes (les conditions d'appuis peuvent être différentes): flambage selon l'axe fort si dans le plan x-z et flambage selon l'axe faible si dans le plan x-y
- Attention à tous les cas non-tenus latéralement (dépl. d'une des extrémité)  $L_K > L$



### 2) Calculer coefficient de réduction: $\chi_K$ → Attention: Différent selon axe (inertie du profilé différente pour axe Y ou Z)

#### 2.1 Élancement au flambage

$$\lambda_K = \frac{L_K}{i} = L_K \sqrt{\frac{A}{I}}$$

#### 2.2 Élancement limite élastique

$$\lambda_E = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

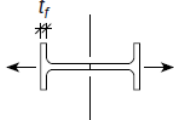
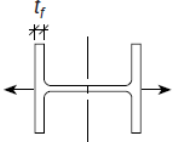
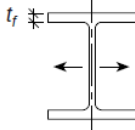

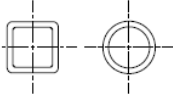
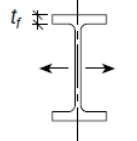
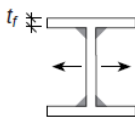
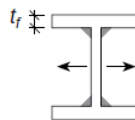
#### 2.3 Coefficient d'élancement

$$\bar{\lambda}_K = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{crK}}} = \lambda_K / \lambda_E = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr}}}$$

Si  $\bar{\lambda}_K < 0.2$  Flambage est empêché, STOP  
(  $\chi_{k,z} = 1$  et  $N_{k,z,rd} = N_{rd}$  )

Sinon, calculer coefficient de réduction au flambage  $\chi_k$

### 3) Choisir type de courbe de flambage, SIA 263 figure 7

a	b	c	d
profilés laminés à ailes étroites, selon l'axe fort  $(h-t_f)/b > 1,2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$	profilés laminés, selon l'axe fort  $t_f \leq 100 \text{ mm}$	profilés laminés, selon l'axe faible  $t_f \leq 100 \text{ mm}$	profilés laminés, selon les deux axes, ailes épaisses  $t_f > 100 \text{ mm}$
profilés creux, finis à chaud 	profilés laminés, à ailes étroites, selon l'axe faible  $(h-t_f)/b > 1,2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$	profilés en double té soudés, selon l'axe faible  $t_f \leq 40 \text{ mm}$	profilés en double té soudés, selon l'axe faible  $t_f > 40 \text{ mm}$

Les cas les plus fréquents:

- IPE selon axe Y: courbe A
- IPE selon axe Z: courbe B
- HEA selon axe Y: courbe B
- HEA selon axe Z: courbe C

Contre-exemple: HEA 500

$$(h-t_f)/b = 467/300 = 1,56 > 1,2$$

⇔ Courbe a

# 4) Calculer le coefficient de réduction de flambage

## A. Par calcul

### A.1 Trouver $\alpha_K$

Tableau 8: Facteurs d'imperfection  $\alpha_K$

Courbe de flambage	a	b	c	d
Facteur d'imperfection $\alpha_K$	0,21	0,34	0,49	0,76

### A.2 Calculer $\Phi_K$

$$\Phi_K = 0,5 [1 + \alpha_K (\bar{\lambda}_K - 0,2) + \bar{\lambda}_K^2]$$

### A.3 $\chi_K$

Déduire

1

$$\chi_K = \frac{1}{\Phi_K + \sqrt{\Phi_K^2 - \bar{\lambda}_K^2}} \leq 1,0$$

## B. En lisant le graphique

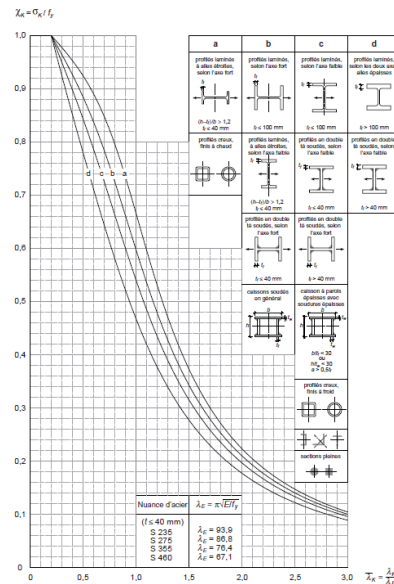
En connaissant:

$$-\bar{\lambda}_K$$

- Type de courbe

On lit  $\chi_K$  dans le graphique figure 7 SIA263

Figure 7: Courbes de flambage



## 5) Vérification de stabilité: $N_{Ed} \leq N_{k,Rd} = \min\left(\frac{\chi_{ky} f_y A}{\gamma_{M1}}, \frac{\chi_{kz} f_y A}{\gamma_{M1}}\right)$

## 1. Table C5:

Valeurs calculées de  $N_{Rd}$ ,  $V_{Rd}$ ,  $M_{y,Rd}$ ,  $M_{z,Rd}$  pour profilé HEA – HEB – IPE – HEM

## 2. Table C4:

- Valeurs tabulées de  $\bar{\lambda}_K$ ,  $\chi_K$
- Valeurs calculées de  $N_{K,Rd}$  pour profilé HEA – HEB – IPE – HEM pour les axes Y et Z (valeurs  $L_k$  par pas de 0.5m, interpolation entre)
  - **NB:** Si la valeur de  $N_{K,Rd}$ , pour un  $L_k$  un peu supérieur, est supérieure à  $N_{Ed}$ , alors pas besoin d'interpoler pour la vérification au flambage

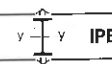


# Extrait table C4, pour IPE selon axe fort

- Exemple:
- IPE 400, S355,  $L_{ky} = 5 \text{ m}$
- $N_{ky} = 2725 \text{ kN}$
- $Note < N_{pl,Rd} = 2857 \text{ kN}$

Zentrishes Knicken: Knickwiderstand  
Flambage centré: Résistance au flambage

$$N_{Ky,Rd} = \sigma_{Kd} \cdot A \quad [kN]$$



Bemessungswerte  
Treppennlinie für  
 $\lambda_K = 50 - 100 - 200$ , max.  $\lambda_K = 250$

Valeurs de calcul  
Lignes brisées pour  
 $\lambda_K = 50 - 100 - 200$ , max.  $\lambda_K = 250$

Raster: Einfluss Eigenlast quer berücksichtigen.

Zone ombrée: Considérer l'effet du poids propre.

IPE	m kg/m	A mm <sup>2</sup>	I <sub>y</sub> mm <sup>4</sup>	Knicklänge in [m] - Longueur de flambage en [m]											
				0.0	1.0	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5		
S235	80	6.0	764	32.4	171	186	148	134	115	96	79	66	54	48	
	100	8.1	1030	40.7	231	227	211	200	185	167	146	126	107	92	
	120	10.4	1320	49.9	295	294	279	269	257	241	223	201	179	167	
	140	12.9	1640	57.4	367	367	347	332	319	304	285	263	239		
	160	15.8	2010	65.8	450	450	437	428	418	406	392	375	356	333	
	180	18.8	2390	74.2	535	535	524	515	505	494	481	466	448	428	
	200	22.4	2850	82.6	638	638	630	620	610	599	586	572	556	538	
	220	26.2	3340	91.1	748	748	742	732	722	710	696	686	670	653	
	240	30.7	3910	99.7	876	876	872	862	851	840	827	814	799	783	
	270	36.1	4590	112	1027	1027	1027	1019	1008	998	984	971	957	942	
	300	42.2	5380	125	1204	1204	1204	1201	1189	1178	1165	1152	1139	1124	
	330	49.1	6290	137	1401	1401	1401	1401	1391	1375	1366	1353	1339	1325	
	360	57.1	7270	150	1627	1627	1627	1627	1622	1610	1597	1583	1569	1554	
	400	68.3	8450	165	1891	1891	1891	1891	1891	1890	1887	1883	1878	1862	
	450	77.6	9690	185	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2197	2182	2168	2153	
	500	90.7	11600	204	2599	2599	2599	2599	2599	2599	2599	2599	2599	2599	
	550	106	13400	223	2989	2989	2989	2989	2989	2989	2989	2989	2989	2989	
	600	122	15600	243	3491	3491	3491	3491	3491	3491	3491	3491	3491	3491	
	750x137	137	17600	303	3917	3917	3917	3917	3917	3917	3917	3917	3917	3917	
	750x147	147	18700	298	4195	4195	4195	4195	4195	4195	4195	4195	4195	4195	
	750x173	173	22100	305	4946	4946	4946	4946	4946	4946	4946	4946	4946	4946	
	750x196	196	25100	310	5618	5618	5618	5618	5618	5618	5618	5618	5618	5618	

IPE	m kg/m	A mm <sup>2</sup>	I <sub>y</sub> mm <sup>4</sup>	Knicklänge in [m] - Longueur de flambage en [m]											
				0.0	1.0	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5		
S355	80	6.0	764	32.4	258	246	204	170	135	106	85	69	57	47	
	100	8.1	1030	40.7	348	339	304	276	240	202	167	138	115	97	
	120	10.4	1320	49.9	446	440	406	385	345	317	276	236	201	172	
	140	12.9	1640	57.4	554	551	520	500	474	442	403	359	315	276	
	160	15.8	2010	65.8	680	680	648	629	606	577	542	501	455	408	
	180	18.8	2390	74.2	808	808	760	761	739	714	683	646	603	555	
	200	22.4	2850	82.6	964	964	938	918	889	873	843	811	771	725	
	220	26.2	3340	91.1	1129	1129	1107	1085	1067	1043	1016	984	947	905	
	240	30.7	3910	99.7	1322	1322	1304	1283	1262	1238	1211	1181	1147	1107	
	270	36.1	4590	112	1652	1652	1640	1620	1498	1475	1450	1422	1390	1355	
	300	42.2	5380	125	1819	1819	1815	1794	1772	1749	1724	1697	1668	1635	
	330	49.1	6290	137	2116	2116	2116	2098	2075	2052	2028	2000	1971	1939	
	360	57.1	7270	150	2458	2458	2458	2440	2418	2394	2368	2340	2309	2275	
	400	68.3	8450	165	2857	2857	2857	2837	2813	2787	2761	2735	2705	2671	
	450	77.6	9690	185	3310	3310	3310	3290	3265	3238	3211	3183	3153	3119	
	500	90.7	11600	204	3822	3822	3822	3802	3777	3750	3722	3694	3664	3630	
	550	106	13400	223	4530	4530	4530	4530	4530	4525	4496	4466	4435	4404	
	600	122	15600	243	5274	5274	5274	5274	5274	5274	5266	5256	5235	5203	
	750x137	137	17600	303	5917	5917	5917	5917	5917	5917	5917	5917	5917	5917	
	750x147	147	18700	298	6322	6322	6322	6322	6322	6322	6322	6322	6322	6322	
	750x173	173	22100	305	7472	7472	7472	7472	7472	7472	7472	7472	7472	7472	
	750x196	196	25100	310	8486	8486	8486	8486	8486	8486	8486	8486	8486	8486	

# Stabilité – Vérification au Flambage

Selon l'axe considéré

Objectif: 
$$\frac{N_{Ed}}{N_{K,Rd}} + \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \cdot \frac{\omega M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

SIA 263 5.1.9

- Cas 2 N+My

- Cas 3 N+Mz

1. Vérifier flambage hors plan empêché (relaxation):  $\bar{\lambda}_K, z < 0.5$  &  $N_{Ed} < \frac{N_{k,z}}{\gamma_{M1}}$

2. Calculer  $N_{K,Rd} = \min\left(\frac{\chi_{ky} f_y A}{\gamma_{M1}}, \frac{\chi_{kz} f_y A}{\gamma_{M1}}\right)$

selon l'axe y

3. Calculer  $N_{cr}$  
$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_K^2}$$

selon l'axe z

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{Ky}^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{Kz}^2}$$

On choisit l'axe en fonction du moment de flexion qu'on est en train de vérifier

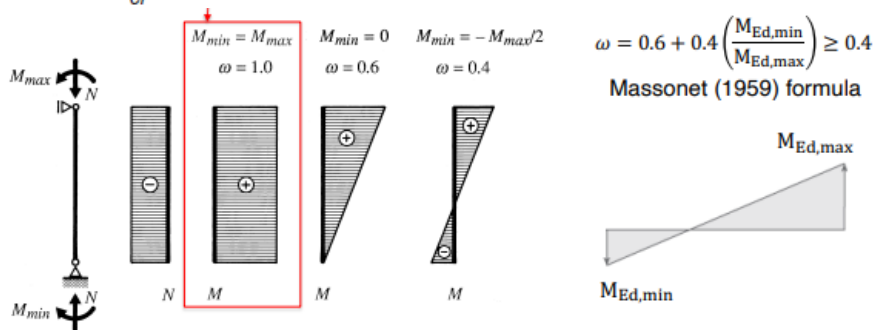
# Stabilité – Vérification au Flambage

Selon l'axe considéré

Objectif: 
$$\frac{N_{Ed}}{N_{K,Rd}} + \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \cdot \frac{\omega M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

SIA 263 5.1.9

4. Calculer  $\omega_i$



4. Vérifier au flambage (SIA 263 5.1.9)

5. Si  $\omega_i < 1,0 \Rightarrow$  vérification en section aussi nécessaire

- Cas 2 N+My
- Cas 3 N+Mz

Si M non-linéaire ou cadre libre latéralement, alors  $\omega_i = 1,0$  (§ 5.1.9.1 dernière phrase)

# Calcul de l'effort normal dans le montant

## SIA 260

4.4.3.4

Pour les situations de dimensionnement durables et transitoires, les valeurs de dimensionnement des effets des actions selon (10) seront déterminées comme suit:

$$E_d = E\{\gamma_G G_{k1}, \gamma_P P_{k1}, \gamma_{Q1} Q_{k1}, \psi_{0i} Q_{ki}, X_{d1}, a_d\} \quad (16)$$

Les facteurs de charge  $\gamma_G$  et  $\gamma_Q$ , ainsi que les coefficients de réduction  $\psi_{0i}$ , sont indiqués dans le tableau 1 et dans les annexes A à F. Les facteurs de charge  $\gamma_P$  sont donnés dans les normes SIA 262 et SIA 267.

Charges permanentes

Action de précontrainte

Charge prépondérante

Valeur rare de l'action variable concomitante i

Valeurs caractéristiques

4.4.3.3

Pour les états-limites des types 2 et 3, la sécurité structurale est vérifiée lorsque le critère de dimensionnement suivant est rempli:

$$E_d \leq R_d$$

(15)

Tableau 1: Facteurs de charge pour la vérification de la sécurité structurale

Actions	$\gamma_F$	État-limite		
		Type 1	Type 2	Type 3
Actions permanentes				
– avec effet défavorable	$\gamma_{G,sup}$	1,10 <sup>1)</sup>	1,35 <sup>1)</sup>	1,00
– avec effet favorable	$\gamma_{G,inf}$	0,90 <sup>1)</sup>	0,80 <sup>1)</sup>	1,00
Actions variables				
– en général	$\gamma_Q$	1,50	1,50	1,30
– charges dues au trafic routier	$\gamma_Q$	1,50	1,50	1,30
– charges dues au trafic ferroviaire	$\gamma_Q$	1,45	1,45	1,25
– modèles de charge 1, 2, 4 à 7	$\gamma_Q$	1,45	1,20	1,25
– modèle de charge 3	$\gamma_Q$	1,45	1,20	1,25
Actions du terrain de fondation				
Charges de terre				
– avec effet défavorable	$\gamma_{G,sup}$	1,10	1,35 <sup>2)3)</sup>	1,00
– avec effet favorable	$\gamma_{G,inf}$	0,90	0,80	1,00
Poussée des terres				
– avec effet défavorable	$\gamma_{G,Q,sup}$	1,35	1,35	1,00
– avec effet favorable <sup>4)</sup>	$\gamma_{G,Q,inf}$	0,80	0,70	1,00
Pression hydraulique				
– avec effet défavorable	$\gamma_{G,Q,sup}$	1,05	1,20 <sup>3)</sup>	1,00
– avec effet favorable	$\gamma_{G,Q,inf}$	0,95	0,90	1,00

<sup>1)</sup> G est multiplié par  $\gamma_{G,sup}$  ou par  $\gamma_{G,inf}$ , selon que l'effet d'ensemble de l'action est défavorable ou favorable.

<sup>2)</sup> Pour des hauteurs de remblai de 2 à 6 m,  $\gamma_{G,sup}$  peut être réduit linéairement de 1,35 à 1,20.

<sup>3)</sup> Lors de l'application de la méthode observationnelle, des valeurs réduites sont admises dans certains cas, selon la norme SIA 267.

<sup>4)</sup> Pour la butée des terres exerçant une action favorable, on a  $F_d = R_d$ , selon la norme SIA 267.

# Question 2.1

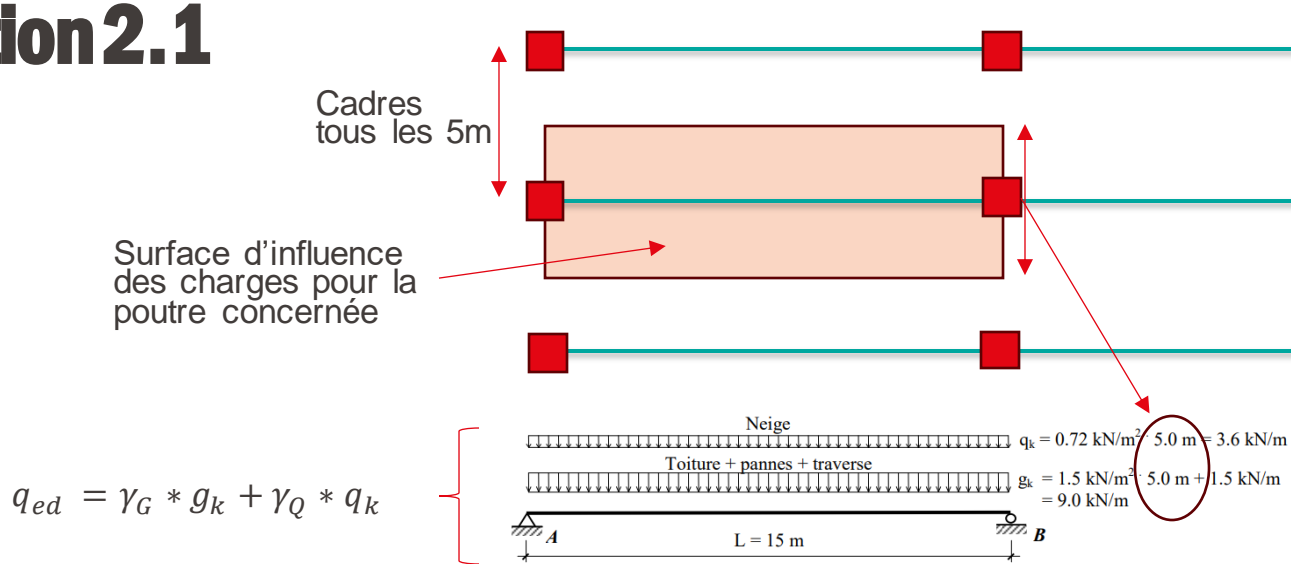


Figure 4 – Système statique et charges d'une traverse

Selon le système statique & le type de charges  
 ➔ SZS C4 : réactions d'appuis/diagramme moments

# TGC 10 : lectures et exercices conseillés

- Cours:

Chapitre 6: 231- 253

- Exercices:

6.1. et 6.2