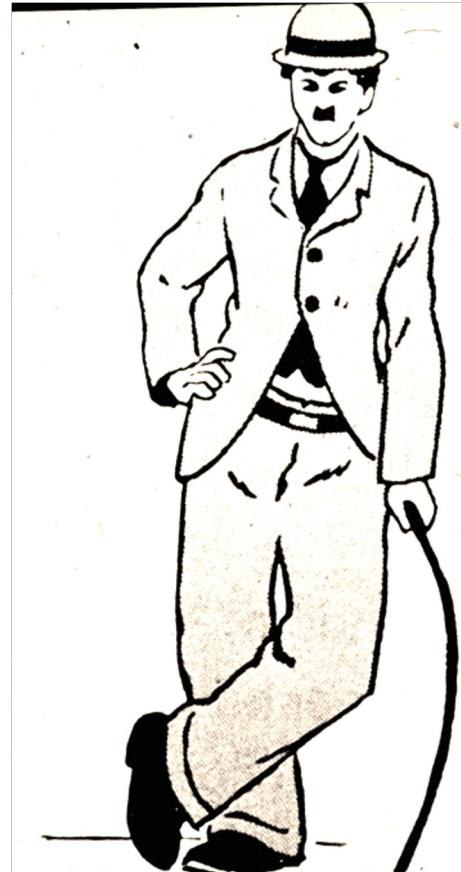
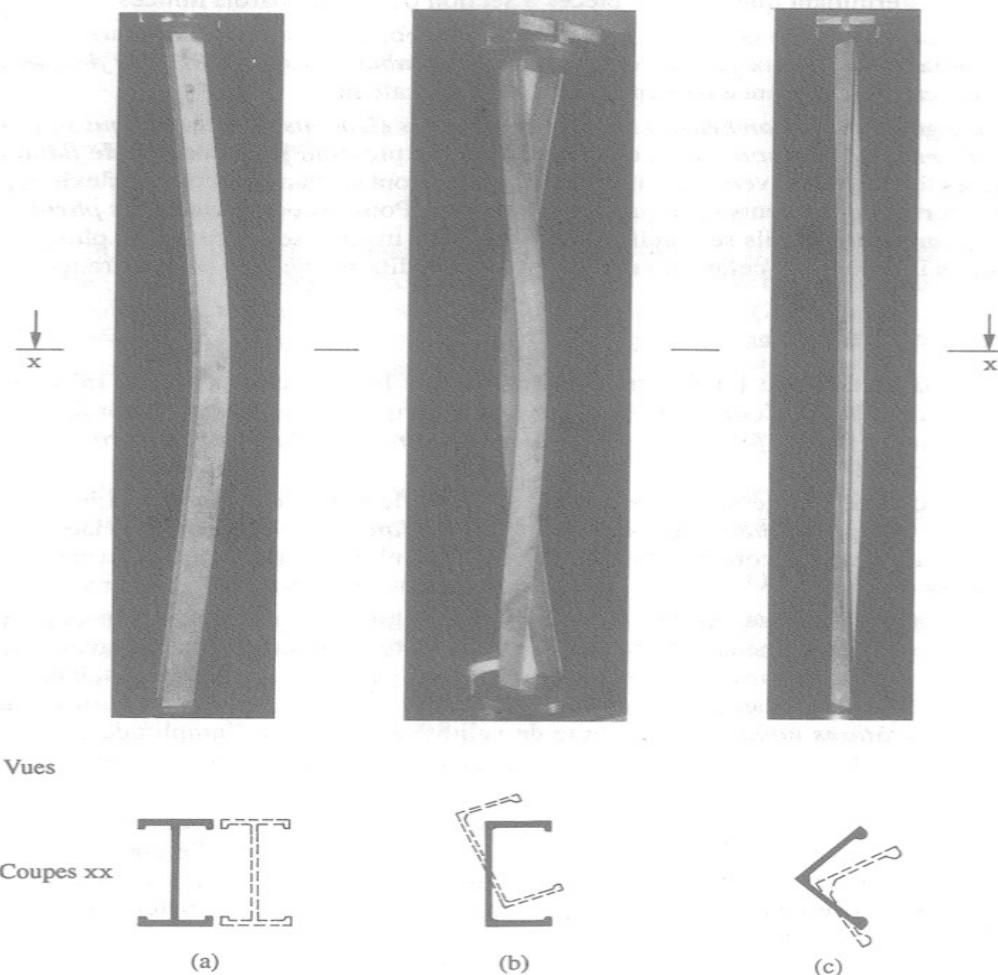


Cours structures en métal

TGC 10, chapitres 10 et 6 :
Flambage

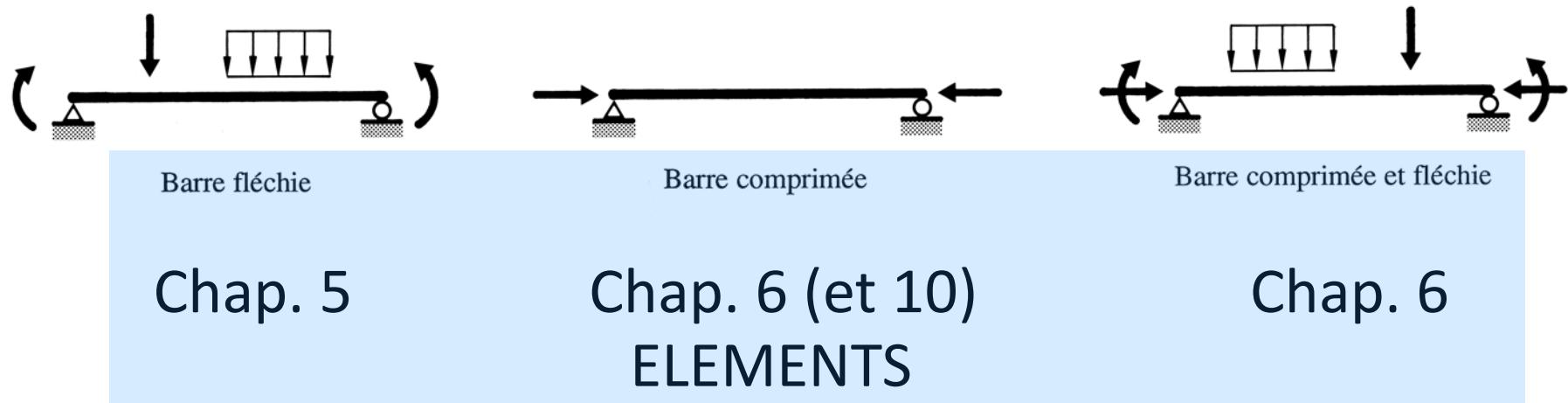


TG 2, chap. 20. Exemples différents modes de flambage



On commence en n'étudiant que les modes en flexion:
(a) cas commun

Fig. 6.1: Différents chargements sur poutre-poteau

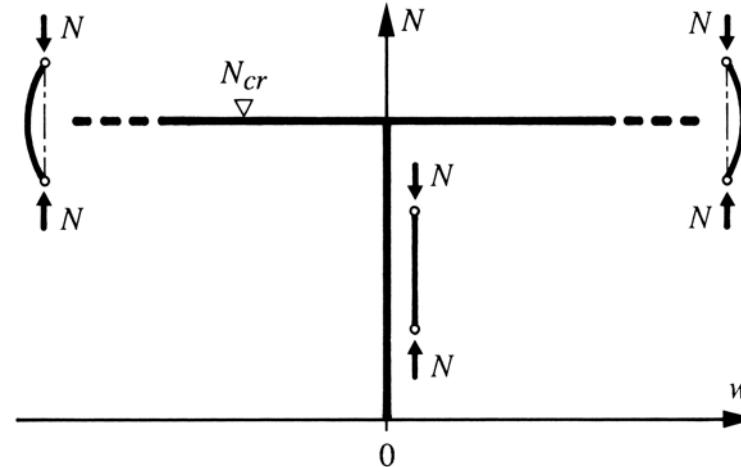
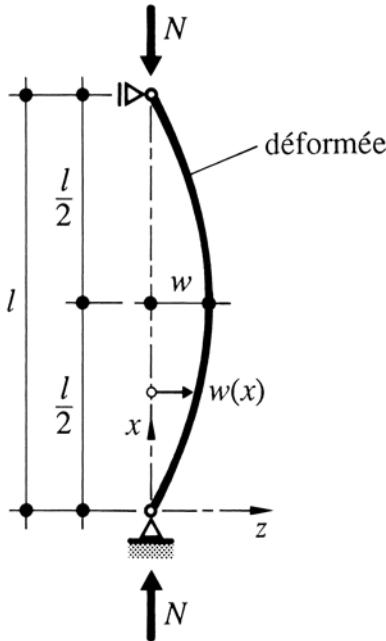


Rappel, résistance en section (chap. 4):

$$\text{Compression: } N_{Rd} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M1}} \quad \text{Classes de section ?}$$

$$\text{Interaction N + M : } \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0$$

Fig. 10.2: Flambage plan barre biarticulée (bifurcation)

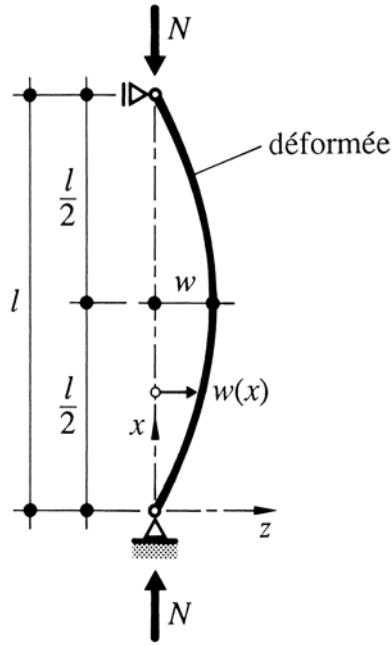


Wikimedia commons

Équilibre entre $M_{intérieur}$ et $M_{extérieur}$:

$$EI_y \frac{d^2w(x)}{dx^2} + Nw(x) = 0$$

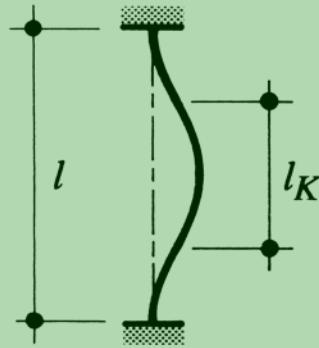
Dérivation formule Euler



$$EI_y \frac{d^2w(x)}{dx^2} + Nw(x) = 0$$

Fig. 10.3: Longueurs de flambage

$$\text{Euler: } N_E = N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{?}$$



$$l_K = 0.5l$$

?

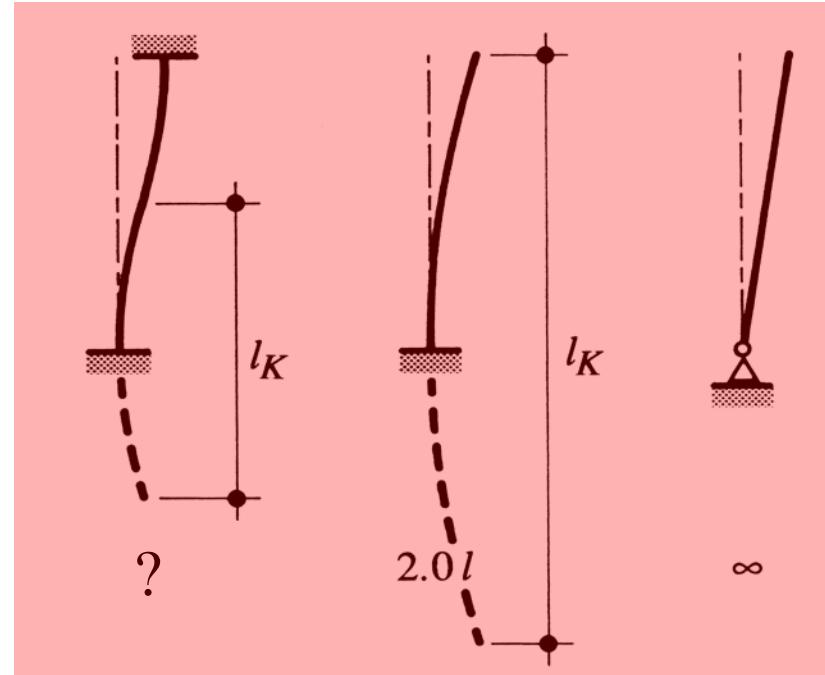
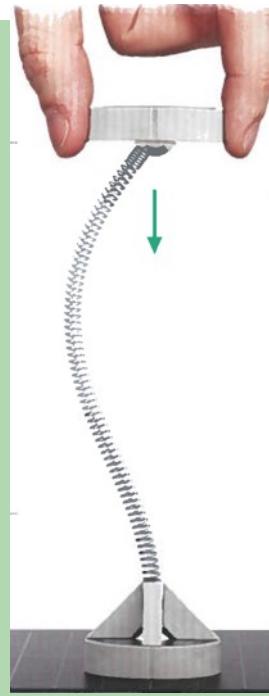
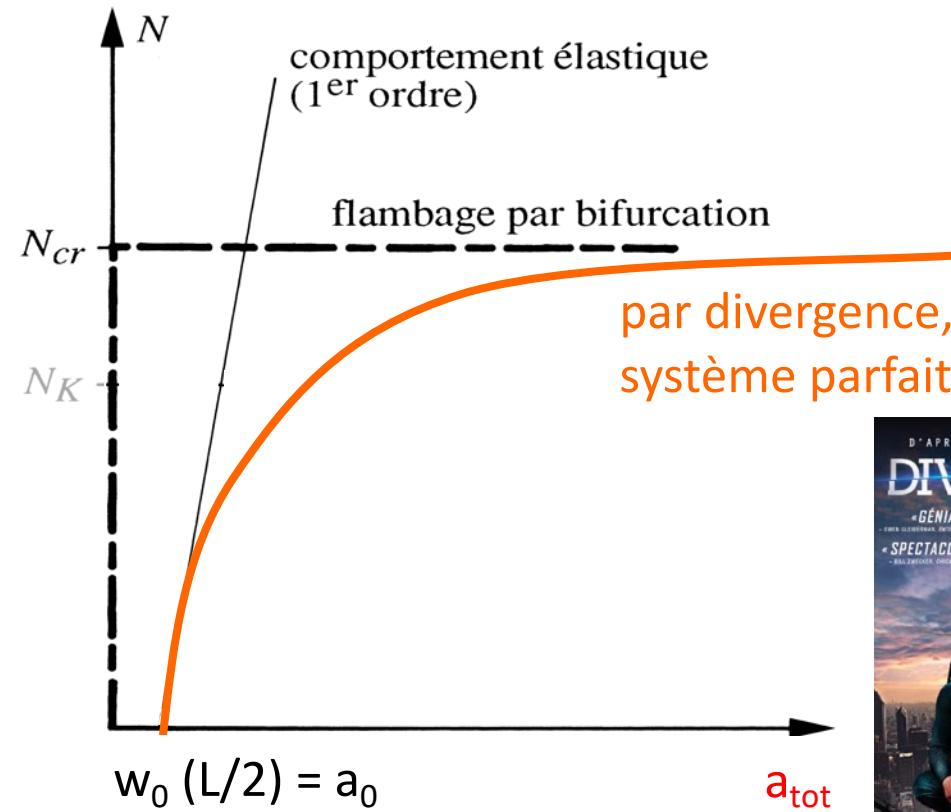
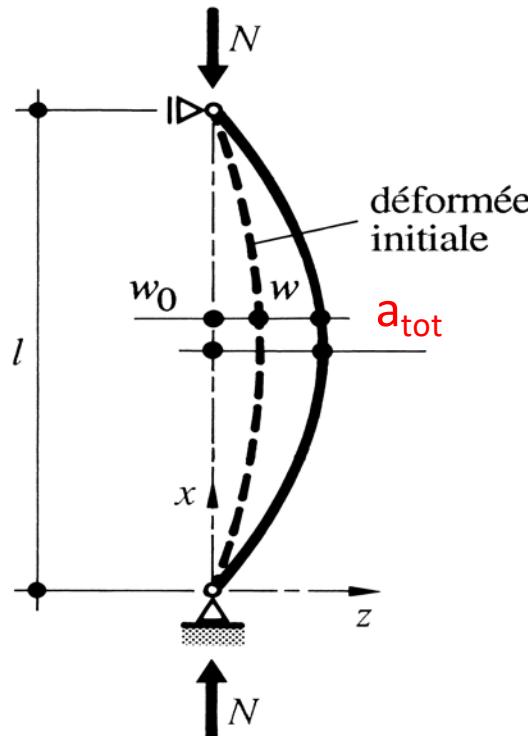


Fig. 10.8: Bifurcation - Divergence



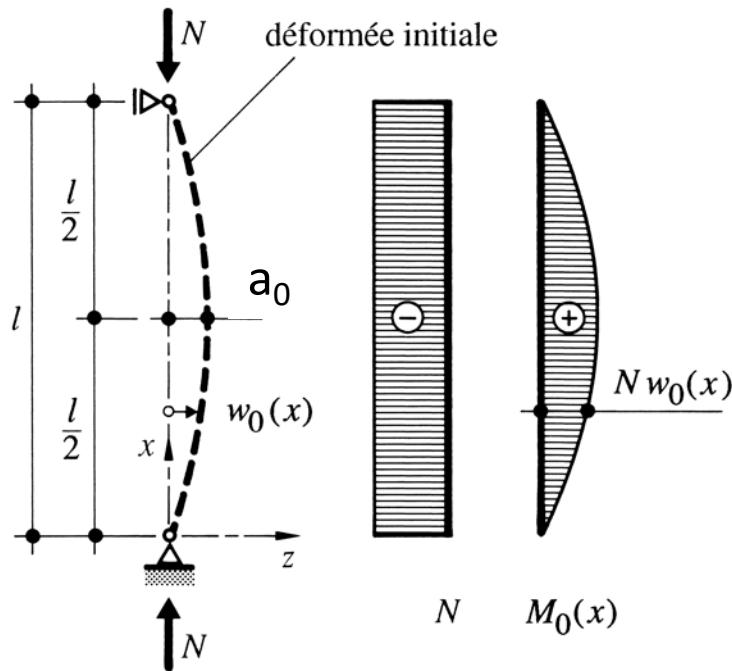
Note: Flèche à mi-hauteur (max) : $w_0(L/2) + w(L/2) = a_{tot}$



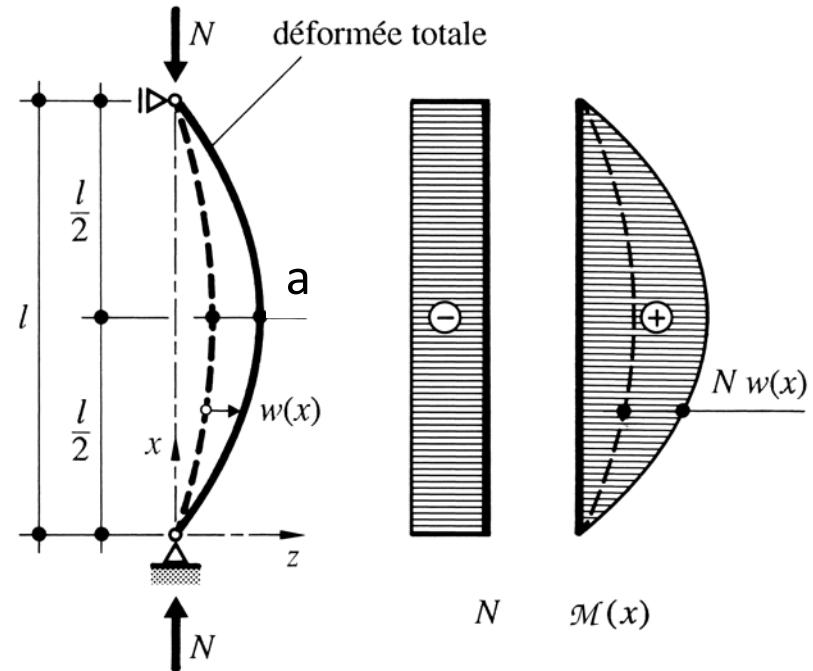
Flambement par divergence, effet 2^{ème} ordre

Fig. 10.9: Infl. imperfection géométrique, effet 2^{ème} ordre = flambage par divergence

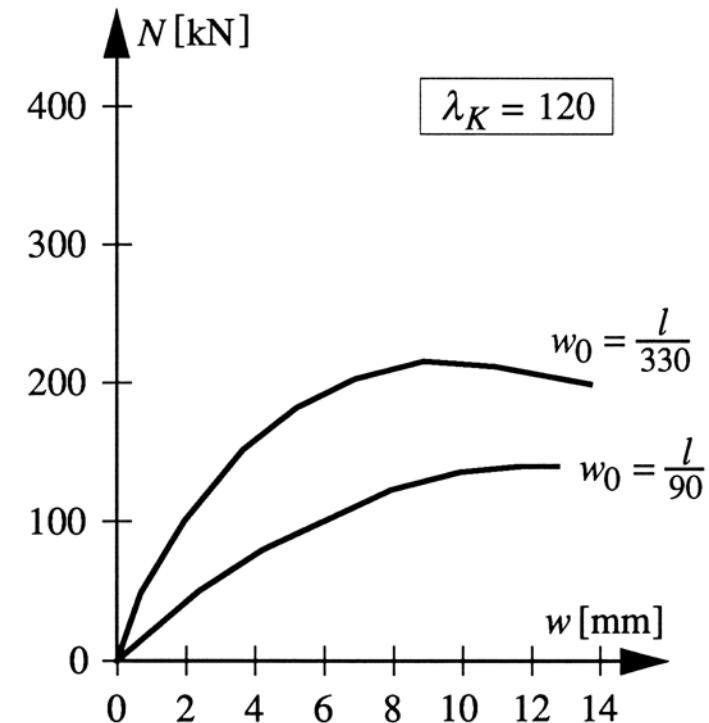
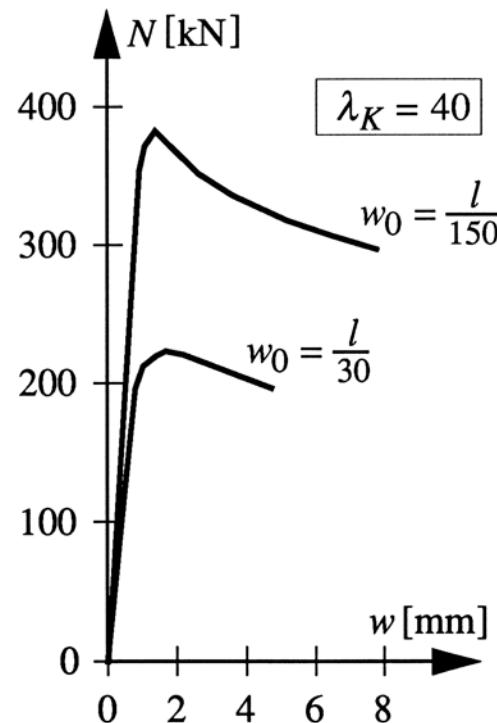
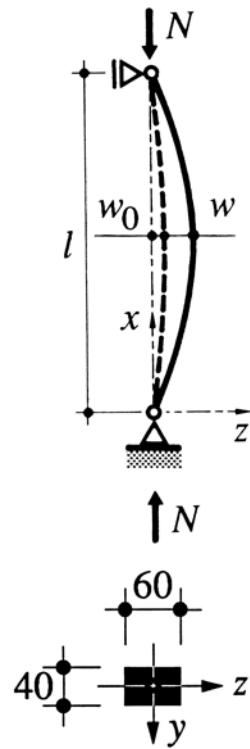
Etat initial



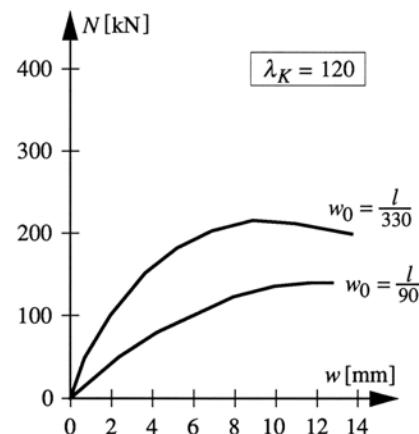
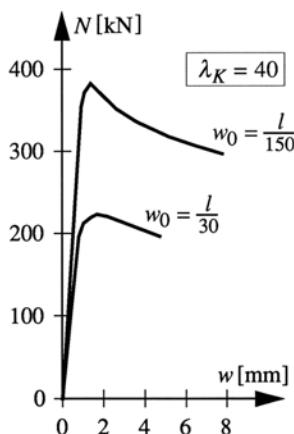
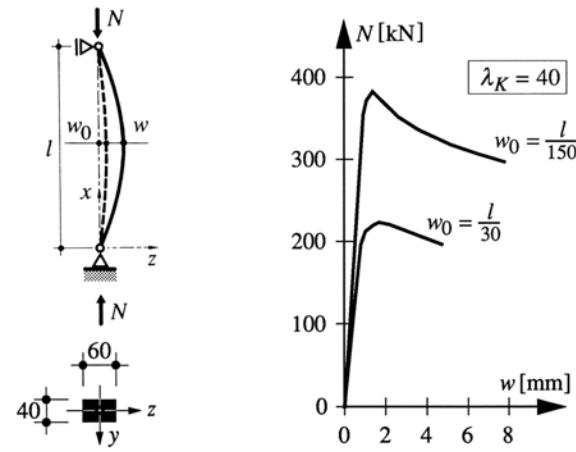
Etat final



1) Imperfections géométriques (Fig. 10.10)



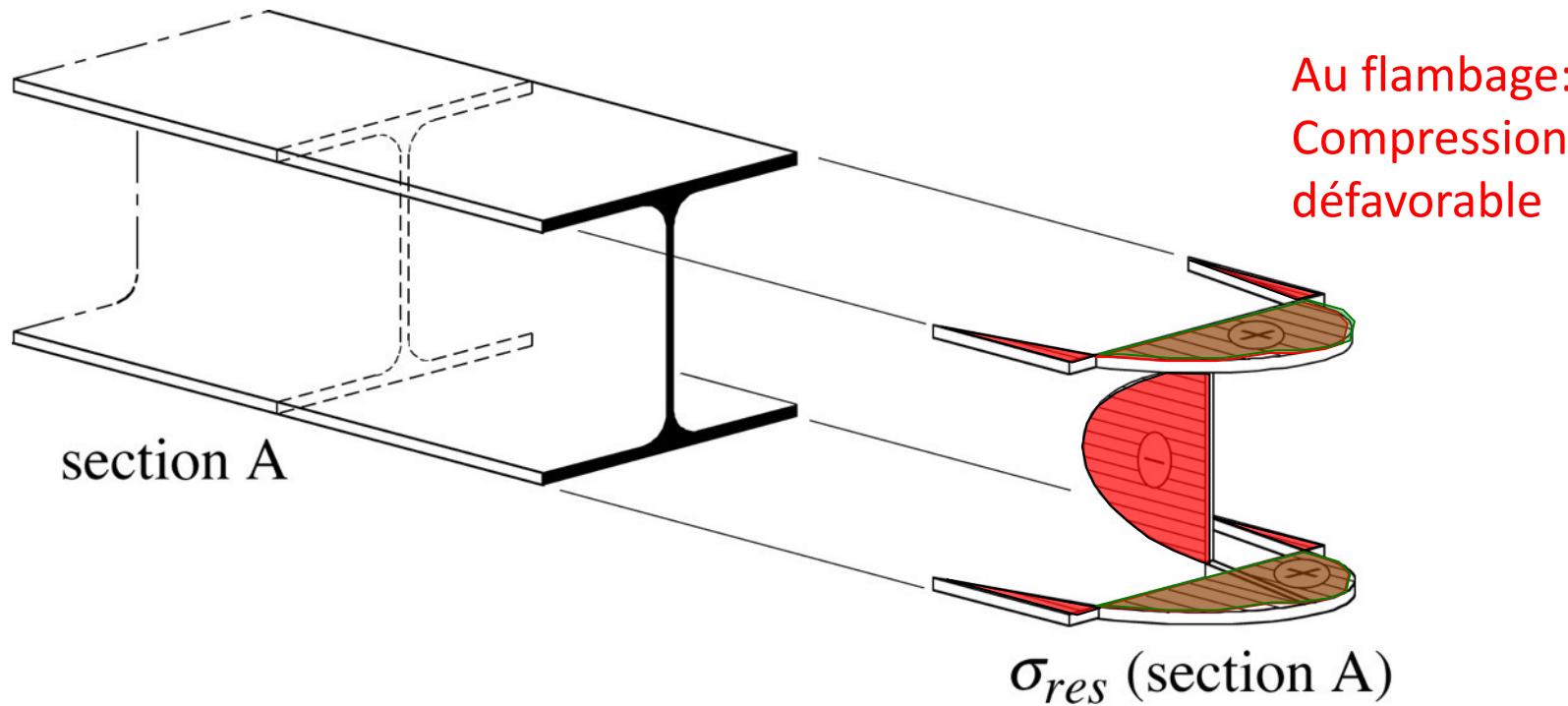
1) Imperfections géométriques (Fig. 10.10)



Quelle combinaison donne la charge de rupture la plus basse ?

- A) $\lambda_K = 40$ et $w_0 = \frac{l}{330}$
- B) $\lambda_K = 120$ et $w_0 = \frac{l}{90}$
- C) $\lambda_K = 40$ et $w_0 = \frac{l}{30}$
- D) $\lambda_K = 120$ et $w_0 = \frac{l}{30}$

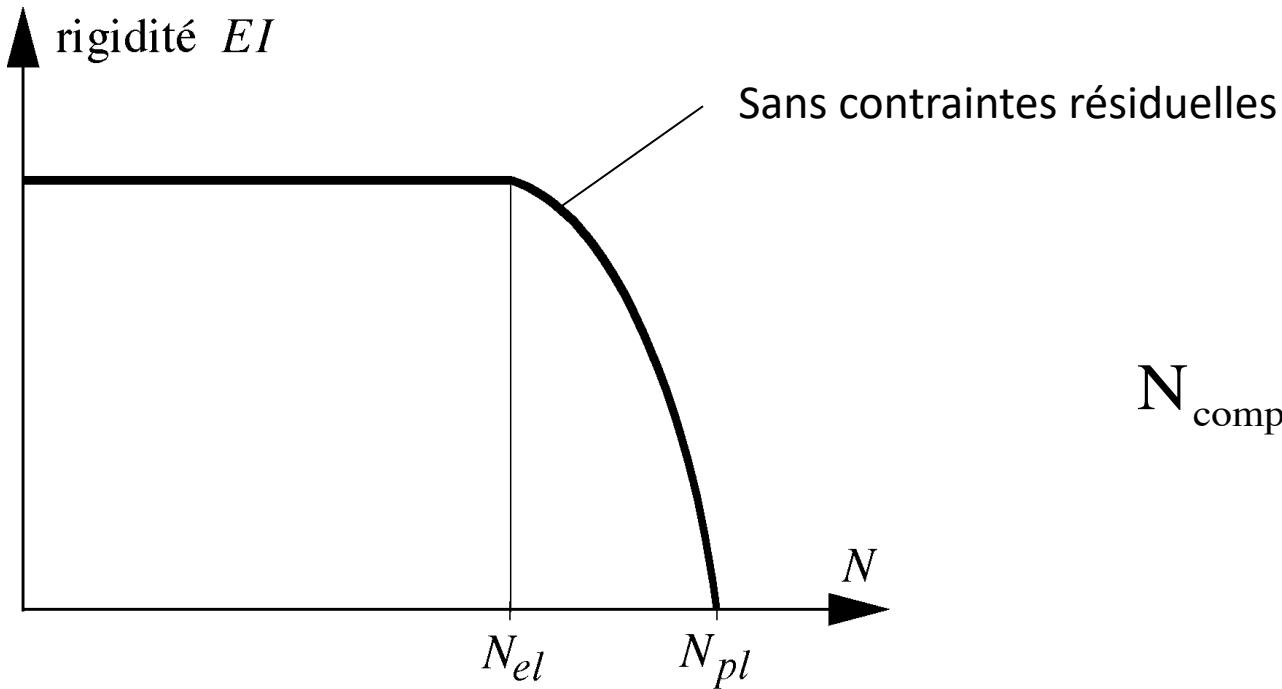
2) Imperfections contraintes résiduelles (Fig. 3.16)



3) Autre source d'imperfection, variation de la limite élastique f_y (§ 3.3.1):

- À travers l'épaisseur: prise implicitement dans base données essais.
- Avec l'épaisseur: si $t > 40$ mm, réduire f_y suivant épaisseur maximale section.

Fig. 10.12: Perte précoce de rigidité



$$N_{\text{comp}} = \text{fct} \left(\frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \right)$$

Fig. 10.8: Bifurcation - Divergence

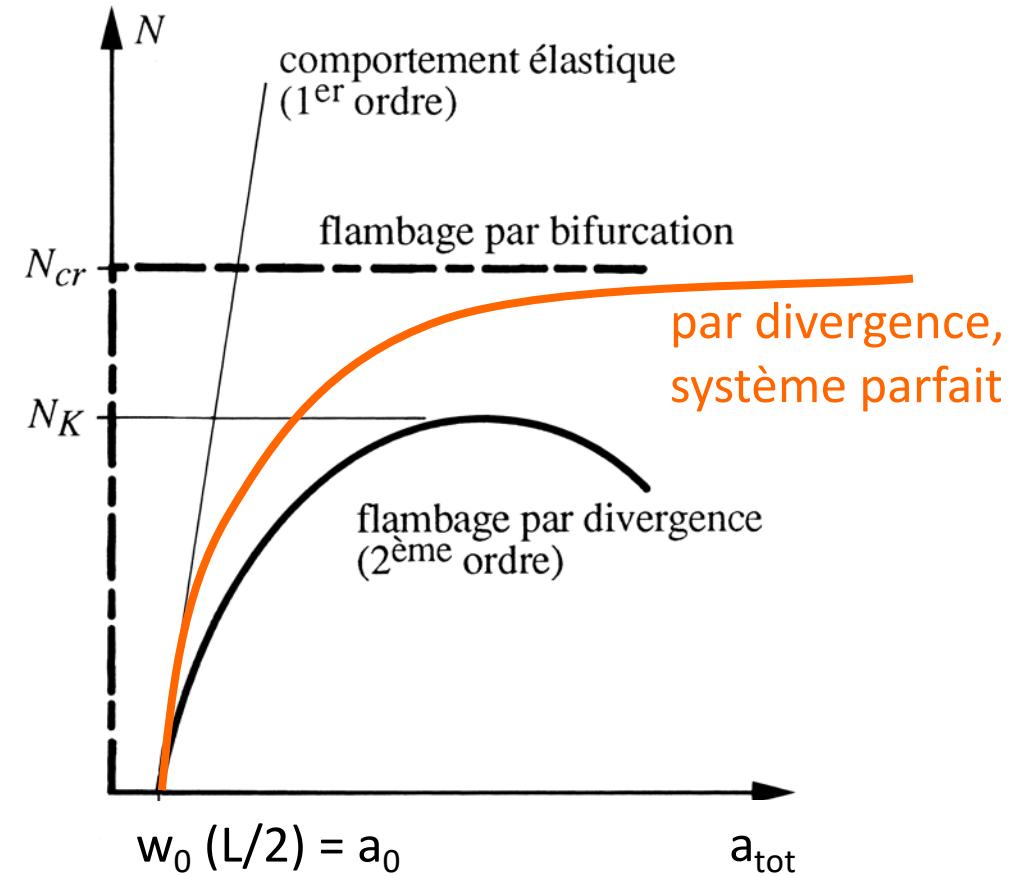
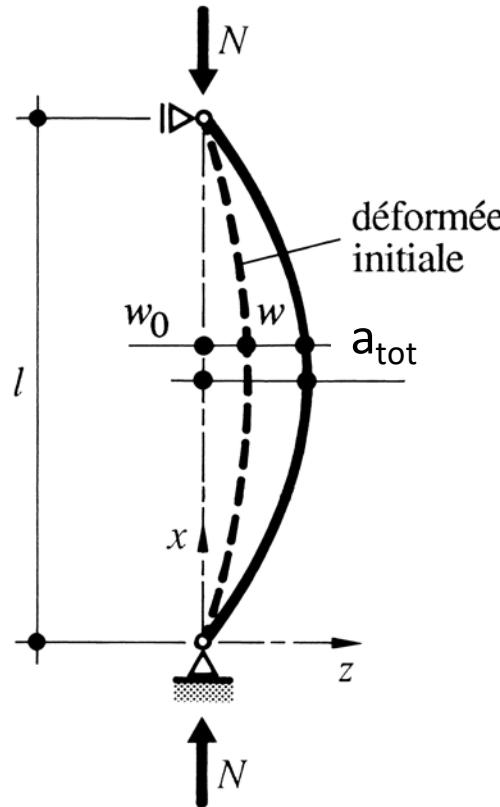
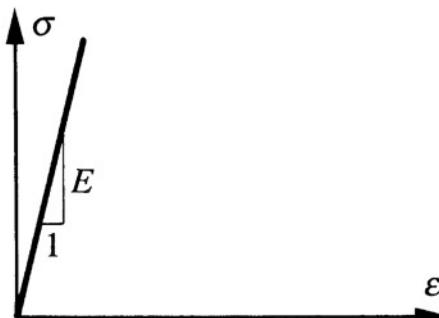
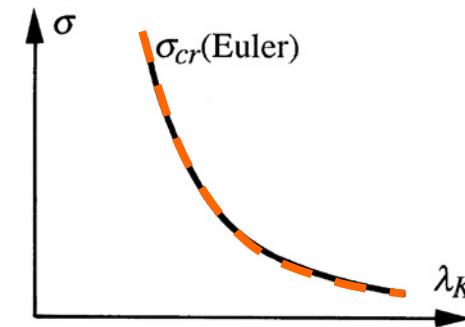
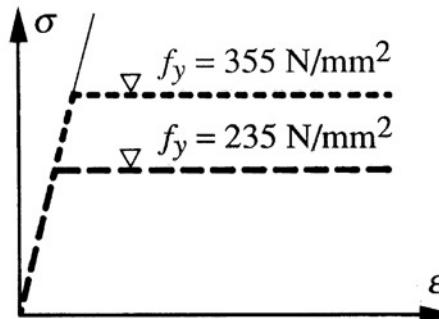


Fig. 10.4: Allure des courbes de flambage

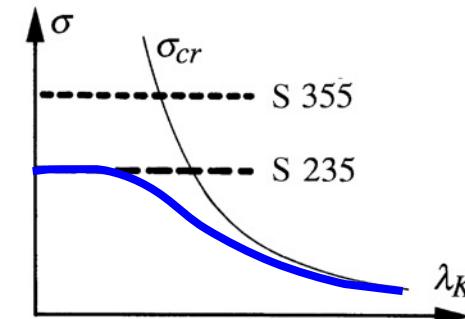
(a) Matériau infiniment élastique linéaire.



(b) Acier : diagramme σ - ε idéalisé.

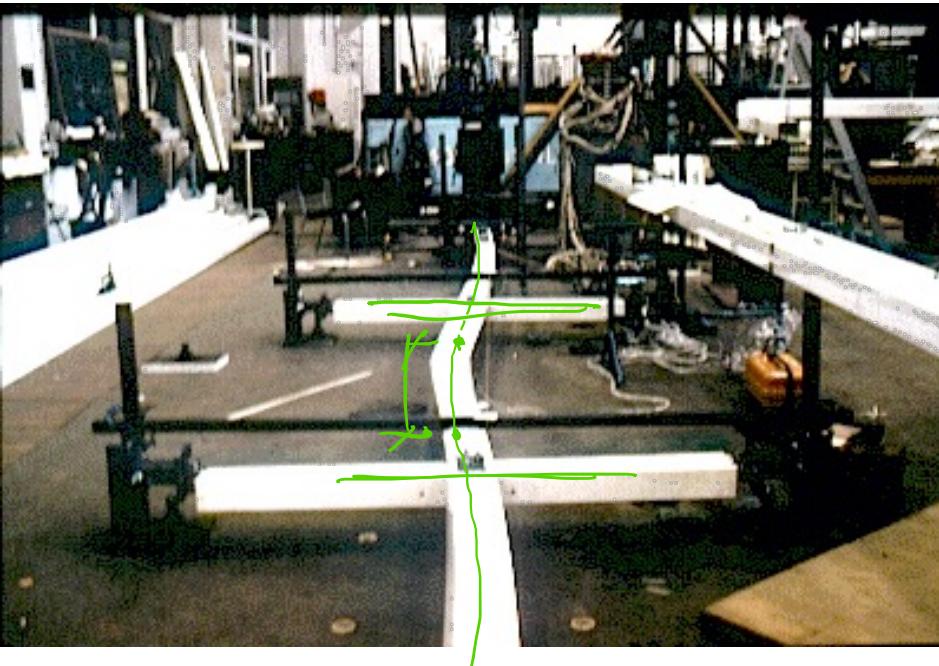


Barre idéale.



Barre idéale.

Détermination résistance au flambage, N_k , essais laboratoire



Syst. statique:

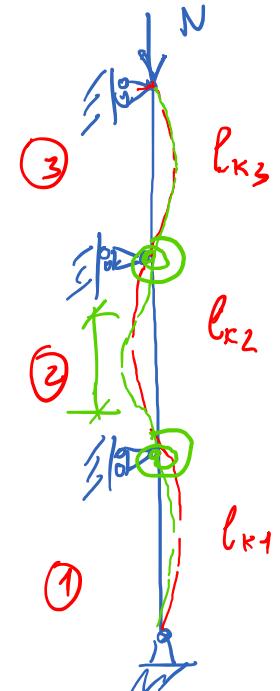


Fig. 10.13: Résultats d'essais de flambage

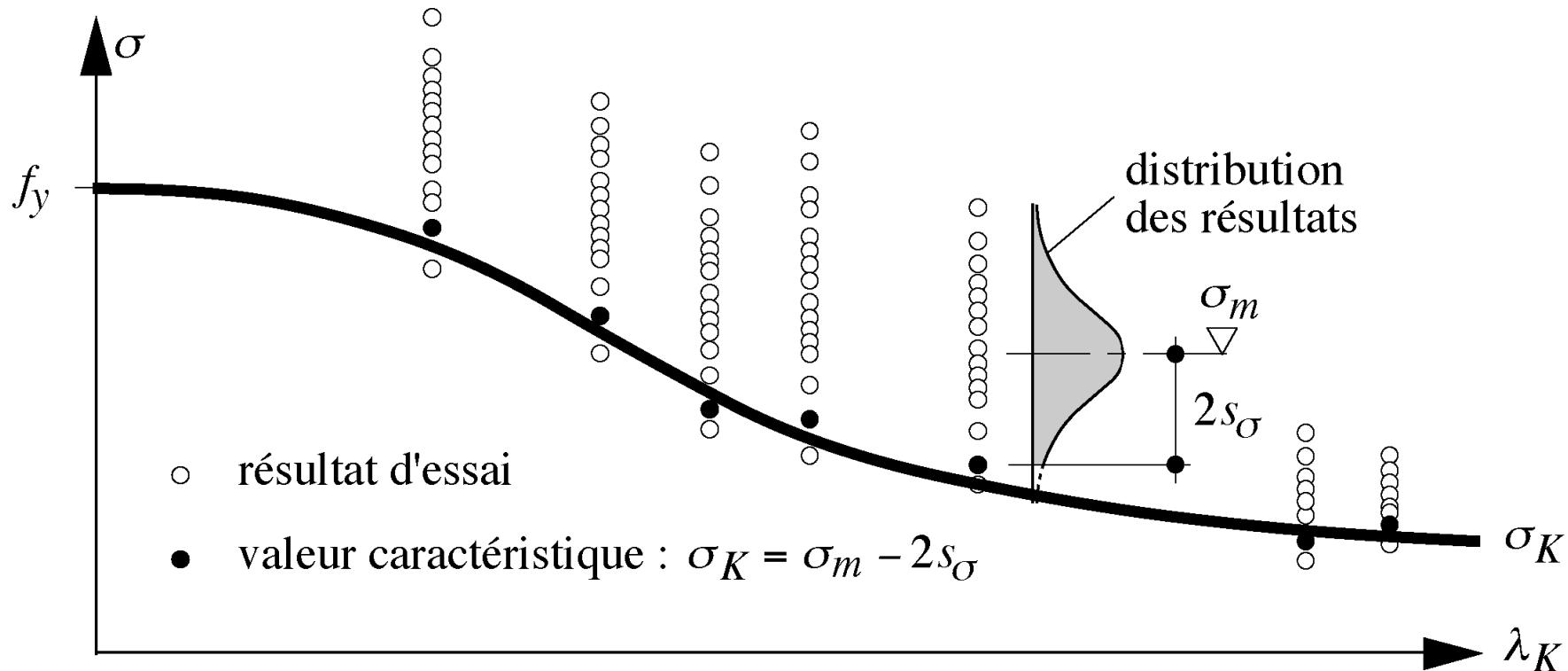
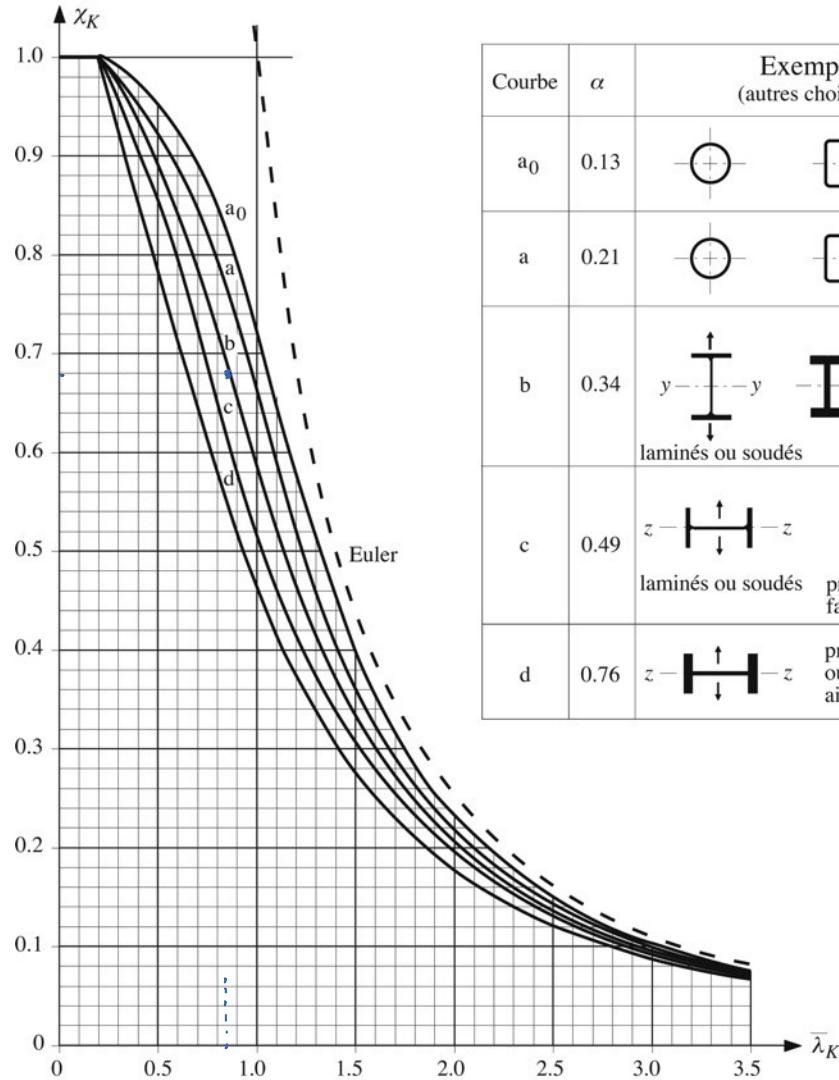


Fig. 6.4: Courbes de flambage (SIA 263 = Eurocode 3)

Note: SIA 263 n'a pas la courbe a_0



Courbe	α	Exemples d'application (autres choix voir norme SIA 263)			
a_0	0.13			profils creux façonnés à chaud acier S 460	
a	0.21			profils creux façonnés à chaud aciers S 235, S 275, S 355	
b	0.34			caissons soudés en général	
c	0.49			laminés ou soudés	profils creux façonnés à froid
d	0.76			laminés ou soudés	profilés laminés ou soudés à ailes épaisses

Fig. 6.4: Courbes de flambage

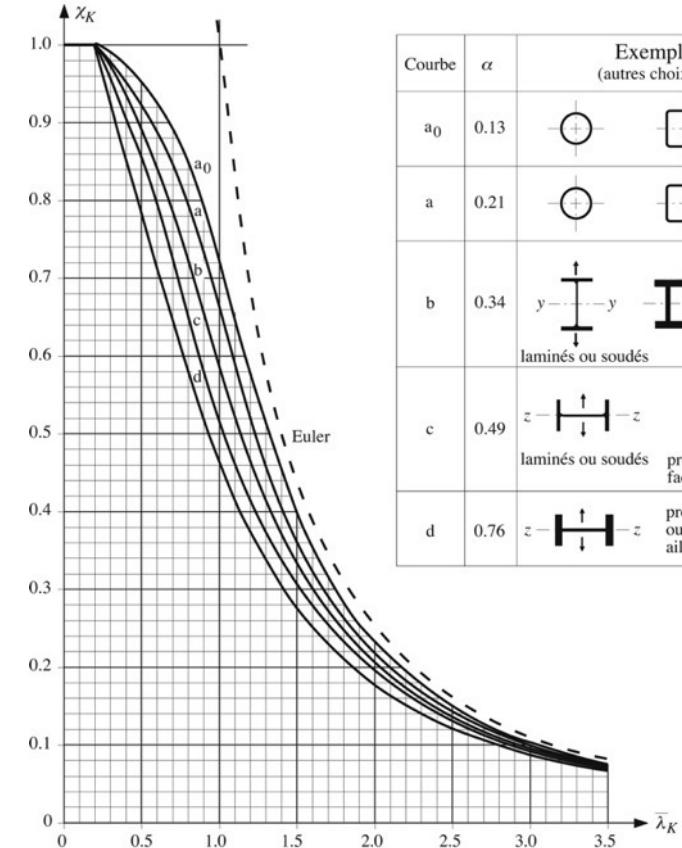
Dia 19: Comment peut s'exprimer N_{cr} , Euler dans ce système d'axes ?

A) $\chi_K = \frac{1}{\bar{\lambda}_K^2}$

B) $\chi_K = \frac{1}{\bar{\lambda}_K}$

C) $\chi_K = \left(\frac{\sigma_K}{f_y}\right)^2$

D) $\chi_K = \bar{\lambda}_K^2 + 1$



Courbe	α	Exemples d'application (autres choix voir norme SIA 263)	
		profil creux façonnés à chaud acier S 460	profil creux façonnés à chaud acières S 235, S 275, S 355
a ₀	0.13		
a	0.21		
b	0.34		caissons soudés en général laminés ou soudés
c	0.49		laminés ou soudés profils creux façonnés à froid
d	0.76		profils laminés ou soudés à ailes épaisses

EN 1993-1-1: Tableau de sélection des courbes de flambage

type de section droite	limites	axes de flamb.	S235	S460
profils laminés	$h/b > 1,2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z y-y z-z	a b b c	a ₀ a ₀ a a
	$h/b \leq 1,2$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z y-y z-z	a c d d	a a c c

Fig. 10.12: Formules des courbes de flambage (SIA 263)

- 4.5.1.3 Pour le flambage d'éléments à section constante, soumis à compression centrée, la valeur de calcul de la résistance doit être déterminée comme suit:

$$N_{K,Rd} = \frac{\chi_K f_y A}{\gamma_{M1}} \quad (7)$$

χ_K facteur de réduction pour le flambage selon le chiffre 4.5.1.4 et la figure 7,

A aire de la section. Dans le cas de sections de la classe de section 4, l'aire réduite selon 5.3.8 doit être prise en considération.

- 4.5.1.4 Le facteur de réduction pour le flambage χ_K sera déterminé comme suit:

$$\chi_K = \frac{1}{\Phi_K + \sqrt{\Phi_K^2 - \bar{\lambda}_K^2}} \leq 1,0 \quad (8)$$

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

$$\bar{\lambda}_K = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,K}}} = \lambda_K / \lambda_E \quad \text{où } \lambda_K = \frac{L_K}{i} = L_K \sqrt{\frac{A}{I}} \quad \text{et } \lambda_E = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\sigma_{cr,K} \text{ contrainte critique de flambage élastique selon Euler } \sigma_{cr,K} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_K^2} = \frac{\pi^2 E i^2}{L_K^2} = \frac{\pi^2 EI}{L_K^2 A}$$

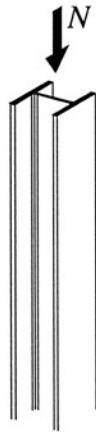
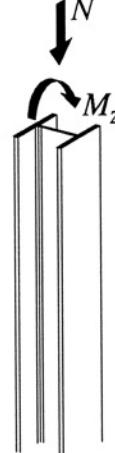
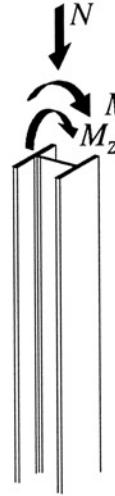
α_K facteur d'imperfection selon le tableau 8

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

Dia 22: Parmi les affirmations suivantes concernant la longueur de flambage L_k , lesquelles sont-elles vraies ?

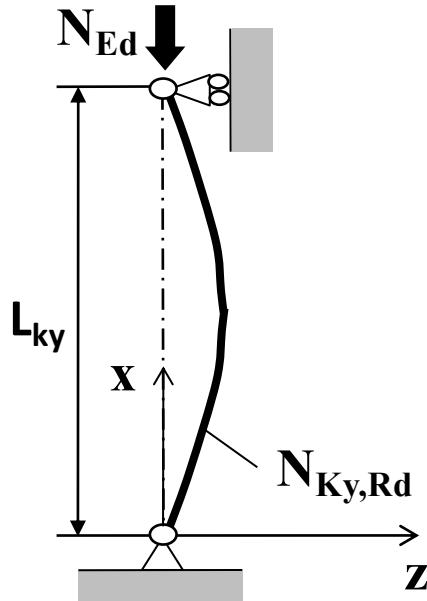
- A) on peut diminuer la longueur de flambage en augmentant la nuance d'acier
- B) L_k est fonction des conditions d'appui
- C) L_k peut être plus grande que la longueur de la barre comprimée
- D) Le module E n'a aucune influence sur L_k .

Tableau 6.5: Les différents cas traités dans le ... traité

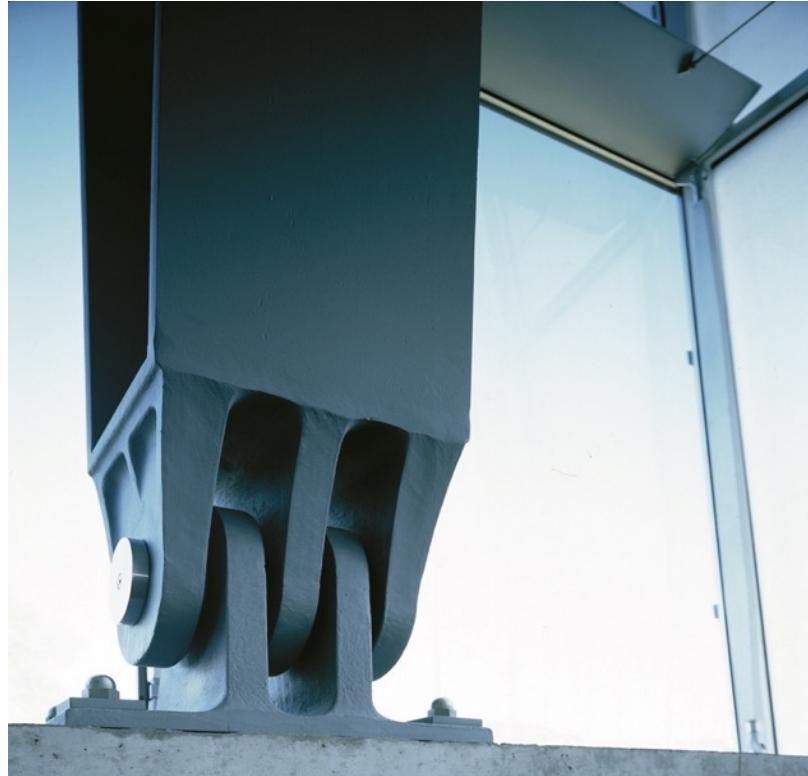
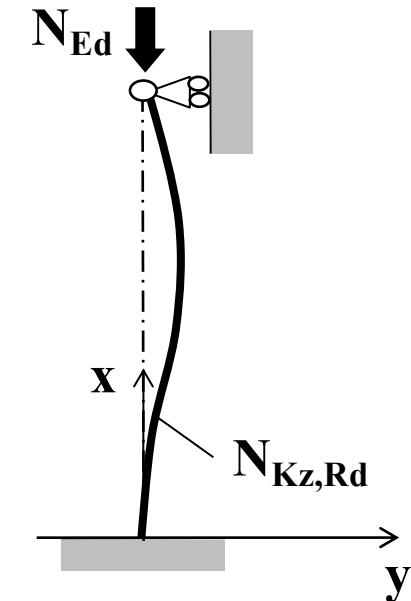
N	$N + M_y$	$N + M_z$	$N + M_y + M_z$	N
				
flambage hors plan et déversement empêchés	flambage hors plan et déversement non empêchés			flambage par flexion et torsion
§ 6.3.1	§ 6.3.2	§ 6.3.3	§ 6.3.4	§ 6.3.5
exemple 6.1	exemple 6.2	exemple 6.3	–	exemple 6.4

2 plans de flambage possibles

Flambage autour de l'axe y
(selon la direction z)



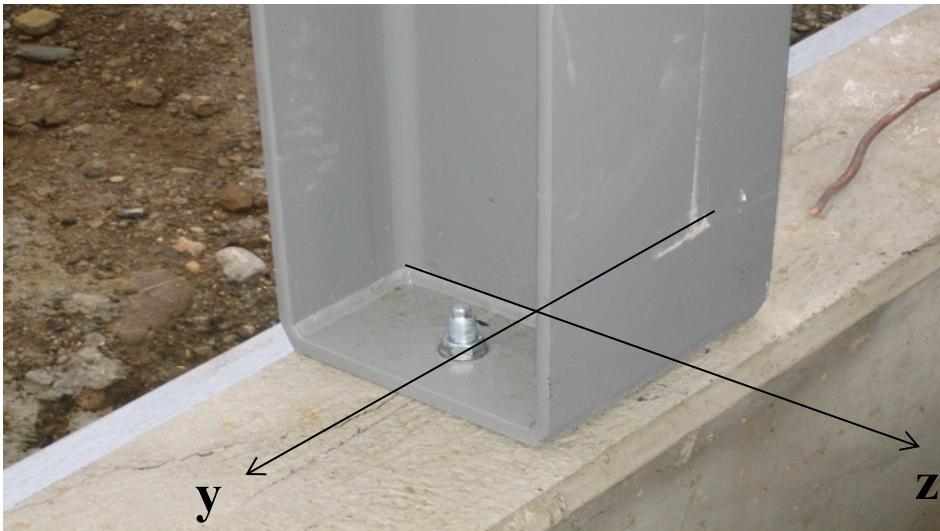
Flambage autour de l'axe z
(selon la direction y)



Prof. A. Nussbaumer

Exemples de pieds de poteaux

Articulé autour de l'axe y
Encastré autour de l'axe z

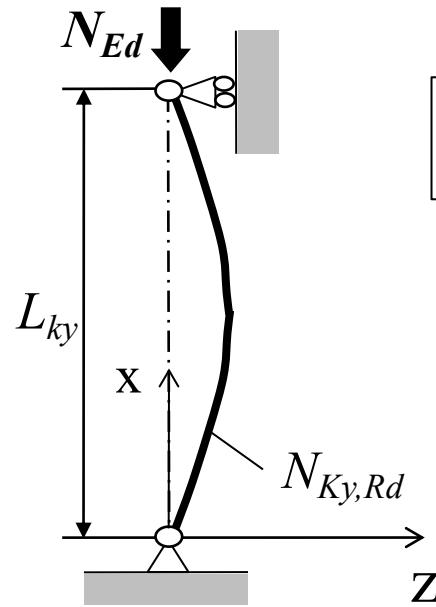


Encastré autour des axes y et z
(photo avant scellement)



Flambage: vérification

Flambage autour de l'axe y
(selon la direction z)



$$N_{Ed} \leq \min(N_{ky,Rd}; N_{kz,Rd})$$

Flambage autour de l'axe z
(selon la direction y)

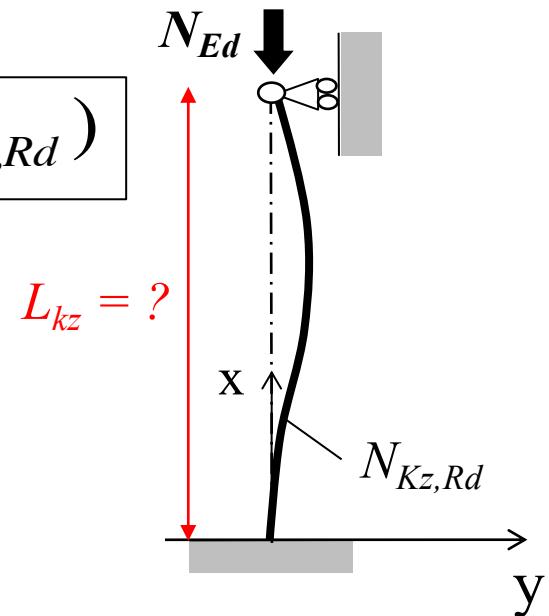


Fig. 6.9 : Exemple 6.1 (poteau)

Profilé HEA 180, S235

Vérifiez pour $N_{Ed} = 640 \text{ kN}$

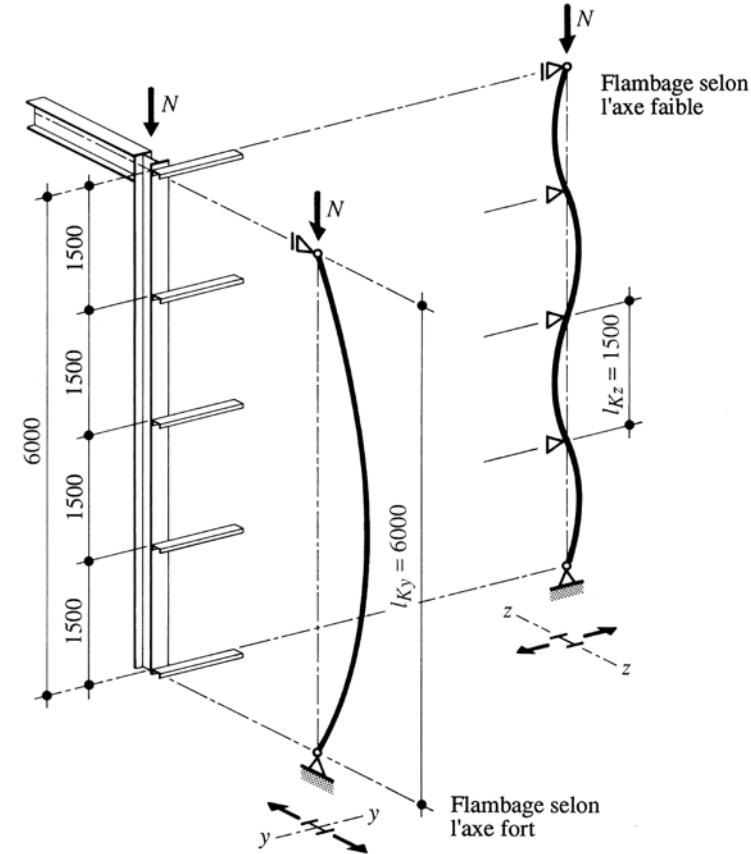
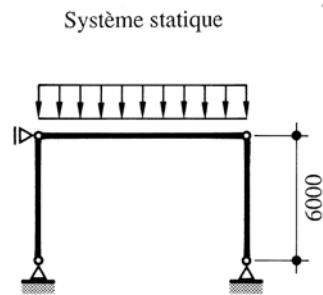
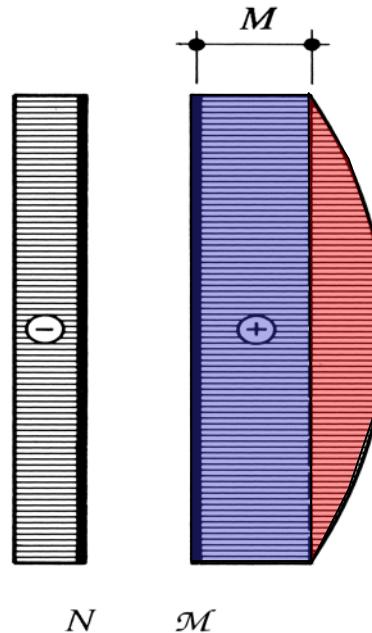
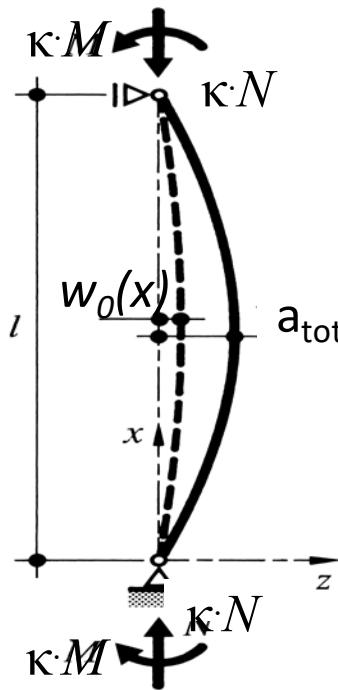
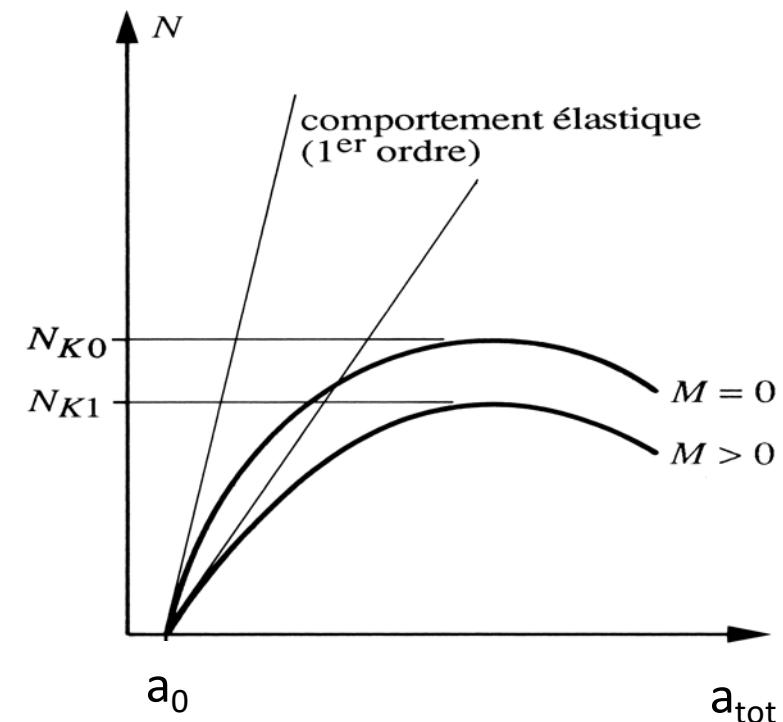


Fig. 6.7: Influence d'un moment sur la charge de flambage



**Second
ordre**



$$w_0(x) = w_{0,L/2} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right) = a_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right)$$

Flambage: APPROCHE I: Formule d'interaction N - M

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad \text{En section}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{K,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad \text{Au flambage ?}$$

Flambage: APPROCHE I: Formule d'interaction N - M

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad \text{En section}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{1}{1 - N_{Ed}/N_{cr}} \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad \text{Sur élément, } M = \text{cste}$$

Rappel: $w_0(x) = a_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right)$

$$w_{tot}(x = L/2) = a_{tot} = a_0 \frac{1}{1 - N/N_{cr}}$$

Flambage: APPROCHE I: Formule d'interaction N - M

$$\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{1}{1 - N_{Ed}/N_{cr}} \frac{\omega \cdot M_{Ed,max}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad \text{Sur élément, cas général} \\ (\text{M} \neq \text{cst})$$

Si $\omega < 1.0$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad \text{Vérif. en section aussi nécessaire}$$

Flambage: APPROCHE I: Formule d'interaction N - M

$$\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{1}{1 - N_{Ed}/N_{cr}} \frac{\omega \cdot M_{Ed,max}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad \text{Sur élément, cas général} \\ (\text{M} \neq \text{cst})$$

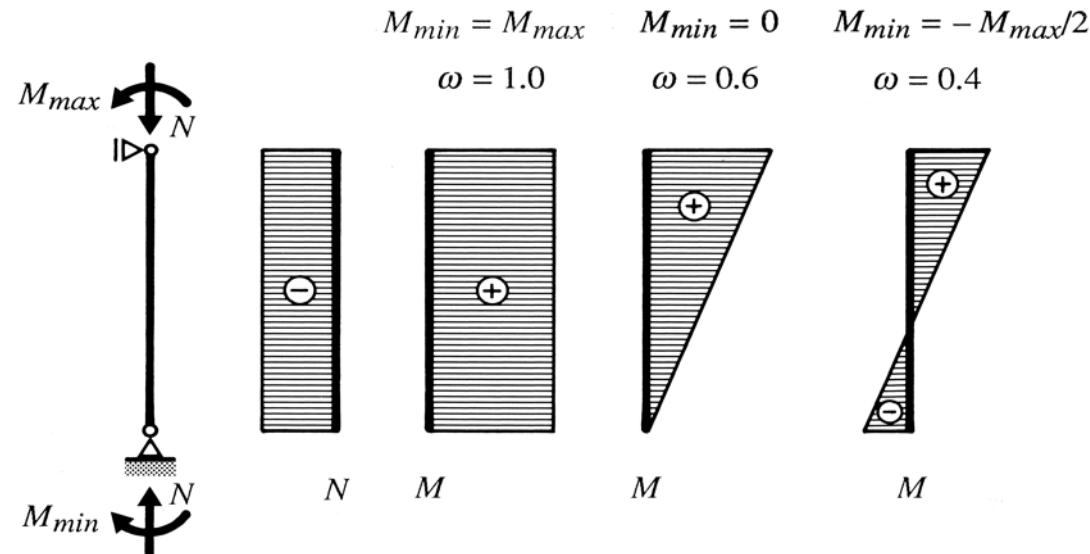
Si $\omega < 1.0$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad \text{Vérif. en section aussi nécessaire}$$

Dia 32: Pourquoi ?

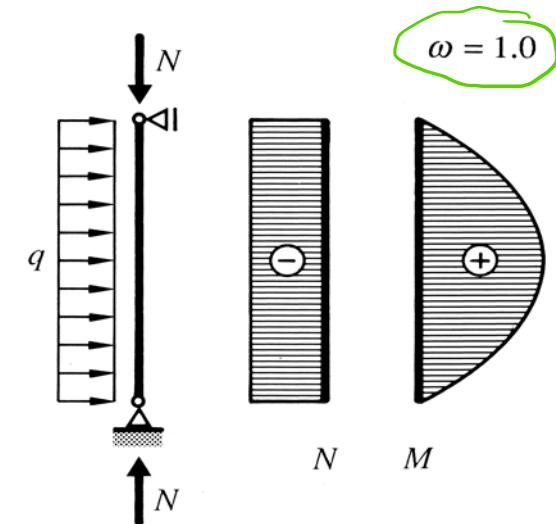
- A) Le 2nd terme de l'équation sera tjs < 1
- B) Une section autre que celle à mi-hauteur peut devenir déterminante
- C) Il faut toujours s'assurer que toutes les sections sont vérifiées
- D) La norme l'exige.

Fig. 6.8: Prise en compte du rapport des moments ω



(a) Diagramme des moments linéaire.

$$\omega = 0.6 + 0.4 \frac{M_{Ed,\min}}{M_{Ed,\max}} \geq 0.4$$

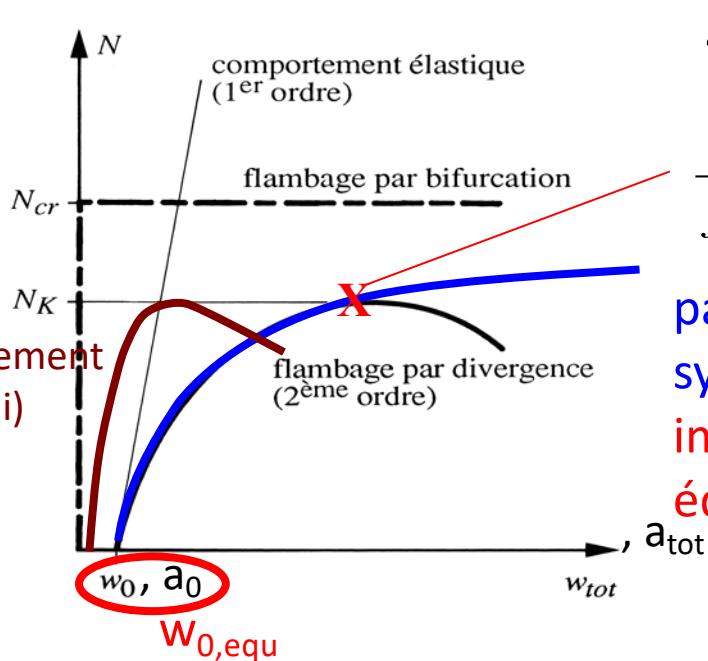
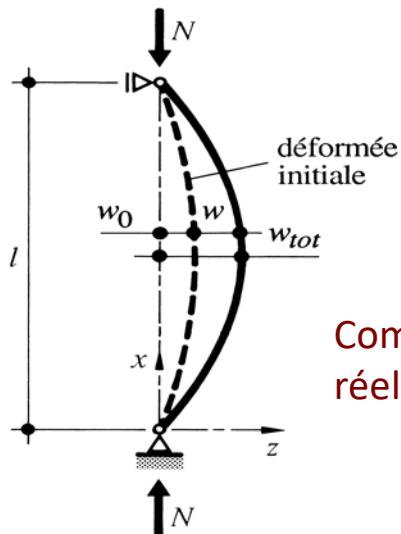


(b) Diagramme des moments non linéaire.
ou non-torsion latéral.

§ 5.1.9

Flambage: APPROCHE II: détermination directe de \mathcal{M}

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{\mathcal{M}_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0$$



$$\mathcal{M}_w = N \cdot w_0 + N \cdot w_1 + \dots$$

$$\frac{N_{Ed}}{f_y A / \gamma_{M1}} + \frac{\mathcal{M}_w}{f_y W_y / \gamma_{M1}} = 1.0$$

par divergence,
système avec
imperfection
équivalente

Flambage: APPROCHE II: détermination directe de \mathcal{M}

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{\mathcal{M}_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0$$

SIA 263

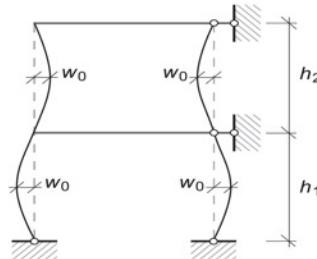
4.2.3 Calculs selon la théorie du second ordre

4.2.3.1 Dans les calculs selon la théorie du second ordre, les déformations initiales et l'effet des contraintes auto-équilibrées seront pris en compte par l'introduction d'imperfections équivalentes. Les tolérances d'exécution sont comprises dans les valeurs indiquées aux chiffres 4.2.3.2 à 4.2.3.5. A la place des imperfections équivalentes, on peut également introduire des forces équivalentes.

Pour les cadres dont les noeuds peuvent se déplacer latéralement, il suffit en général d'introduire des imperfections équivalentes sous la forme d'inclinaisons initiales φ et, pour les cadres tenus latéralement, sous la forme de défauts de rectitude initiaux w_0 des barres et des poutres.

4.2.3.2 Dans le cas de cadres tenus latéralement, le défaut de rectitude initial sera déterminé selon la figure 3, en analogie avec le mode de flambage déterminant.

Figure 3: Imperfections équivalentes à introduire pour le calcul de barres droites comprimées dans les cadres tenus latéralement (défaut de rectitude initial avec flèche w_0 au milieu de la barre)



Type de barre	Flèche w_0 de la déformée initiale	
Barres simples avec la courbe de flambage déterminée par leur section, selon la figure 7	EE EP	
a	$L/300$	$L/250$
b	$L/250$	$L/200$
c	$L/200$	$L/150$
d	$L/150$	$L/100$

L longueur de barre.

Flambage: APPROCHE II: détermination directe de M

SIA 262 § 4.3.7

Pièces comprimées.

Excentricité

« équivalente » maximale

4.3.7.2

La vérification doit être menée sur le système déformé à l'aide des valeurs de calcul des différentes actions. Le calcul des déformations sera basé sur les dispositions des chiffres 4.2 et 4.3.2. On tiendra aussi compte des imperfections géométriques au sens du chiffre 4.1.3.2, de la fissuration, de la non-linéarité du comportement des matériaux ainsi que du flUAGE et du retrait du béton.

4.3.7.3

La valeur de calcul du moment de flexion est donné par la relation:

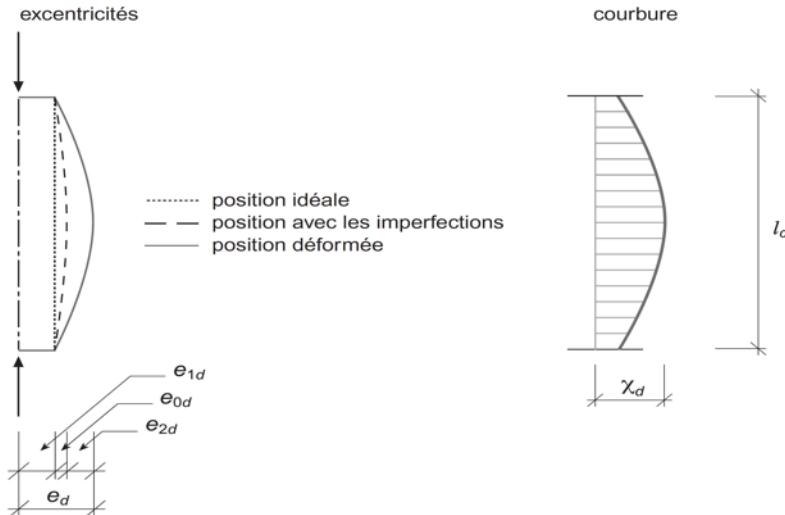
$$M_d = -N_d e_d \quad (57)$$

4.3.7.4

On peut calculer de la manière suivante l'excentricité maximale e_d , soit la distance maximale entre la résultante de l'effort normal et l'axe de l'élément déformé:

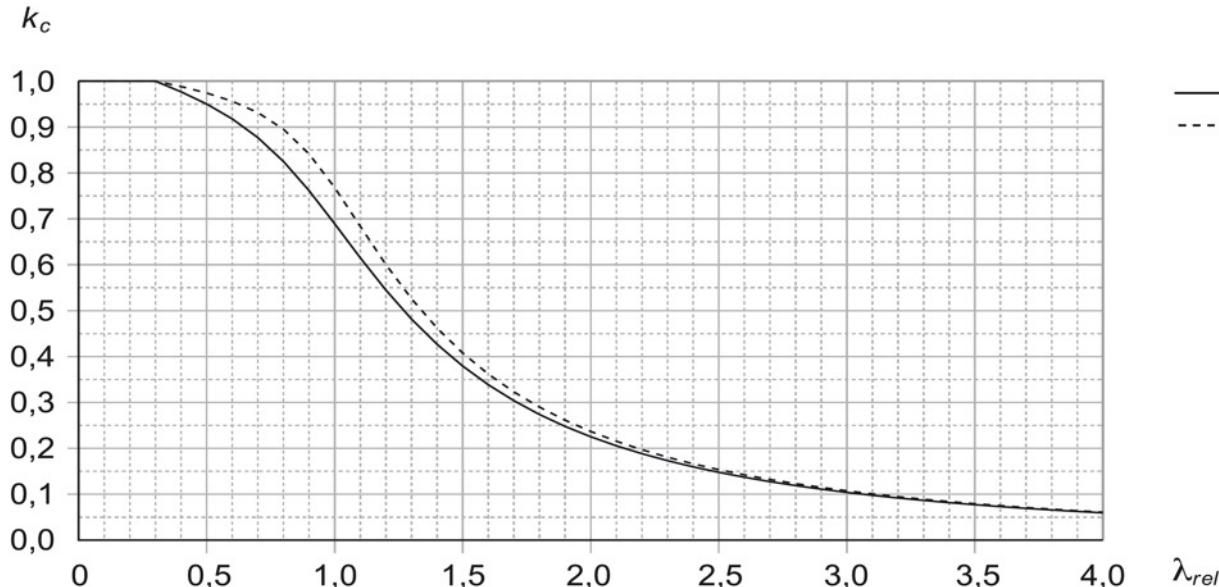
$$e_d = e_{0d} + e_{1d} + e_{2d} \quad (58)$$

Figure 27: Résultante de l'effort normal, excentricités et variation de la courbure



Flambage: éléments en bois, courbes de flambage

SIA 265 § 4.2.8: Stabilité de pièces comprimées



$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

mit $k = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2]$

- pour le bois massif: $\beta_c = 0,2$
- pour le bois lamellé collé: $\beta_c = 0,1$

Formules de stabilité dans les normes, par ex. SIA 263

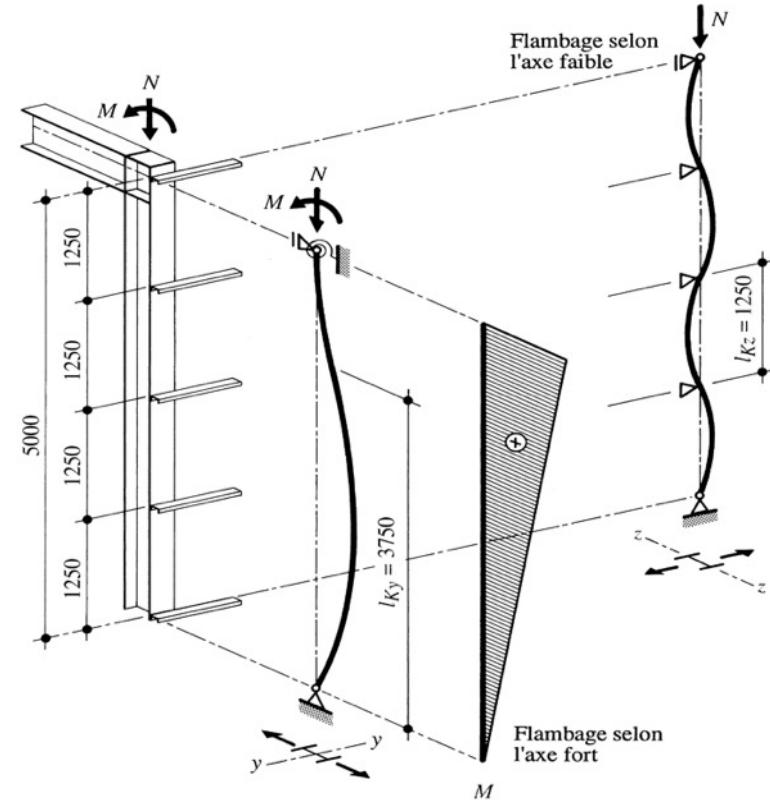
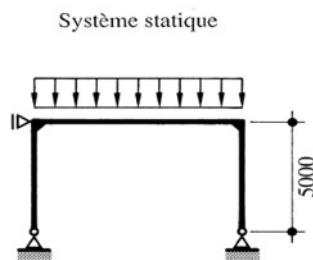
Tableau 7: Renvois pour la vérification de la résistance et de la stabilité aux chiffres de la présente norme, en fonction de la sollicitation et de la classe de section de l'élément considéré

Classe de section		1 (PP) et 2 (EP)	3 (EE)	4 (EER)
Effort normal	Résistance	5.1.2	5.1.2	5.3.2
	Stabilité	4.5.1	4.5.1	5.3.8
Flexion	Résistance	5.1.3	5.2.3	5.3.3
	Stabilité	4.5.2	4.5.2	5.6.2
Effort tranchant	Résistance	5.1.4	5.2.4	5.3.4
	Stabilité	4.5.4	4.5.4	4.5.4
Flexion et effort normal	Selon un seul axe		Selon les 2 axes	
	Résistance	5.1.6	5.2.6	5.3.5
	Stabilité	5.1.9 et 5.1.10	5.2.9	5.3.9, 5.6.2
Flexion et effort tranchant	Résistance	5.1.5	5.2.5	5.3.6
	Stabilité	4.5.2 et 4.5.4	4.5.2 et 4.5.4	4.5.4, 5.6.2 et 5.6.3
Flexion, effort normal et effort tranchant	Résistance	5.1.7 et 5.1.8	5.2.7 et 5.2.8	5.3.7
	Stabilité	4.5.4, 5.1.9 et 5.1.10	4.5.4 et 5.2.9	4.5.4 et 5.3.9

Fig. 6.9 : Exemple 6.2 (poutre-poteau)

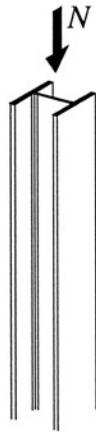
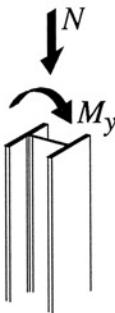
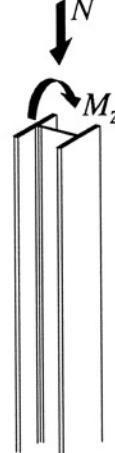
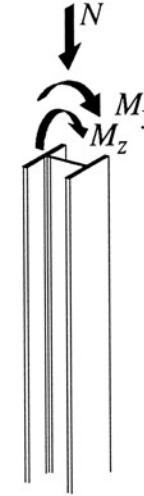
Profilé HEA 280, S235

Hyp.: déversement empêché



Exemple 6.2 (poutre-poteau) suite

Rappel, Tableau 6.5: Les différents cas traités dans le ... traité

N	$N + M_y$	$N + M_z$	$N + M_y + M_z$	N
				
flambage hors plan et déversement empêchés	flambage hors plan et déversement non empêchés			flambage par flexion et torsion
§ 6.3.1	§ 6.3.2	§ 6.3.3	§ 6.3.4	§ 6.3.5
exemple 6.1	exemple 6.2	exemple 6.3	–	exemple 6.4

Effort normal et flexion gauche: $N + M_y + M_z$

- Deux formules dans la SIA 263 § 5.1.10:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{K,Rd}} + \frac{\omega_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cry}}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{D,Rd,min}} + \frac{\omega_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crz}}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\leq 1.0}$$

- Et pour bisymétriques:

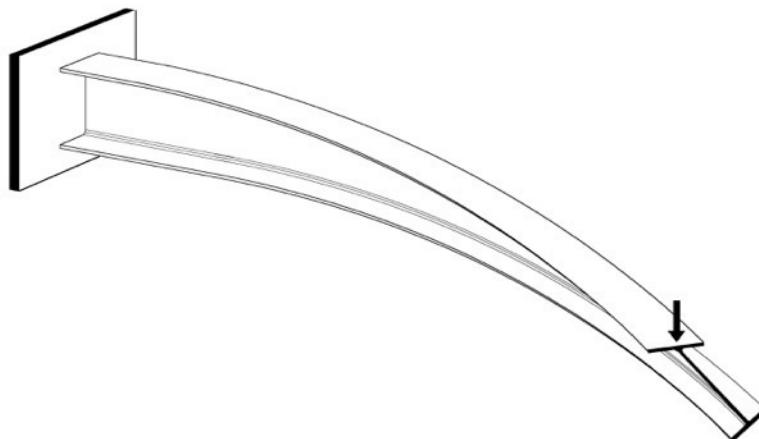
$$\left(\frac{\omega_y M_{y,Ed}}{M_{y,red,Rd}} \right)^\beta + \left(\frac{\omega_z M_{z,Ed}}{M_{z,red,Rd}} \right)^\beta \leq 1$$

Attention: traité qu'interaction $N - M_y$ SANS déversement

$$\frac{N_{Ed}}{N_{ky,Rd}} + \frac{1}{1 - N_{Ed}/N_{cry}} \frac{\omega \cdot M_{y,Ed,max}}{M_{y,Rd}} \leq 1.0$$

VALIDITE: s'assurer que : $l_D \leq l_{cr}$ (et condition limite: $N_{Ed}/N_{pl,Rd} < 15\%$)

Sinon, par ex. console en train de déverser:

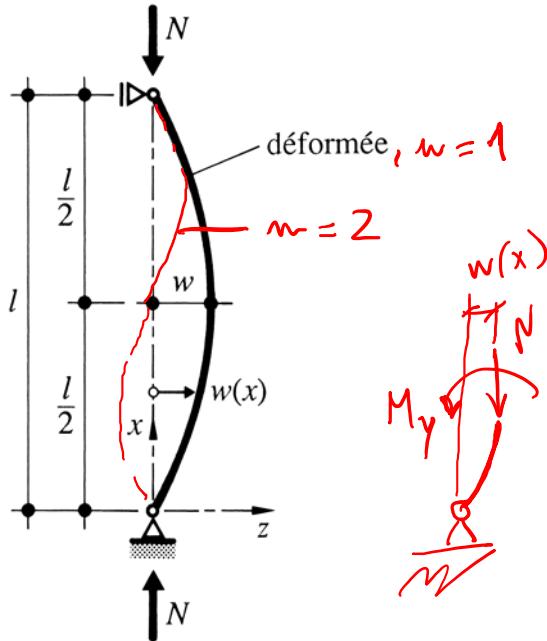


Chap. 5 et Chap .11.
Leçon suivante,
dimensionnement de poutre

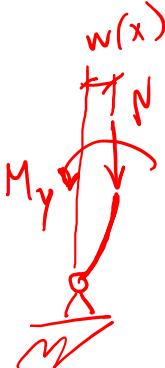


Flambage durant incendie, Photo T. Vallée

Annexe: Dérivation formule Euler



$$EI_y \frac{d^2w(x)}{dx^2} + Nw(x) = 0$$



$$M_y + N \cdot w(x) = 0 \quad w''(x) = + \frac{M_y}{EI_y}$$

$$w''(x) EI_y + N \cdot w = 0 \quad w'' + \frac{N}{EI} w = 0$$

Équ. diff. homogène 2^e ordre.

$$\text{Sol. générale du type: } w(x) = a_1 \sin \frac{m \pi x}{L} + a_2 \cos \frac{m \pi x}{L}$$

Cond. aux limites:

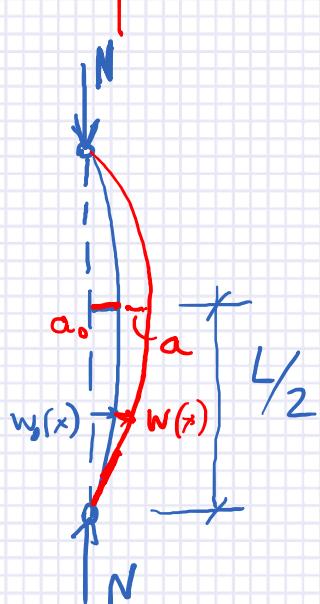
$$w(0) = 0 \quad w(L) = 0 \quad w''(0) = w''(L) = 0$$

$$\rightarrow w(x) = a \cdot \sin \frac{m \pi x}{L} \quad m = \text{nb. d'ondes}$$

$$w = 1 \quad -\alpha \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin \frac{\pi x}{L} \cdot EI_y + N \cdot \alpha \cdot \sin \frac{\pi x}{L} = 0$$

$$\Rightarrow N_{CR} = \frac{\pi^2}{L^2} \frac{EI_y}{L^2}$$

Annexe: Flambement par divergence, effet 2^{ème} ordre



$$M + N \cdot (w_o(x) + w(x)) = 0 \quad w''(x) + \frac{N}{EI} (w_o(x) + w(x)) = 0$$

$w_{\text{tot}}(x)$

$$\rightarrow w'' + \frac{N}{EI} w = - \frac{N}{EI} a_0 \cdot \sin \frac{\pi x}{L}$$

$$\text{Solutions : } w(x) = \frac{a_0}{\pi^2 EI} \sin \frac{\pi x}{L} - 1$$

$$w(x) = \frac{a_0}{N_{CR}/N - 1} \sin \frac{\pi x}{L} \Rightarrow w(L/2) = a = \frac{a_0}{N_{CR}/N - 1}$$

$$a_{\text{tot}} = a_0 + \frac{a_0 N/N_{CR}}{1 - N/N_{CR}}$$

$$\textcircled{1} \quad a_1 = a_0 + a_0 \frac{N/N_{CR}}{1 - N/N_{CR}}, \quad a_{\text{lin}}$$

$$\textcircled{2} \quad a = a_{\text{lin}} \frac{1}{1 - N/N_{CR}}$$

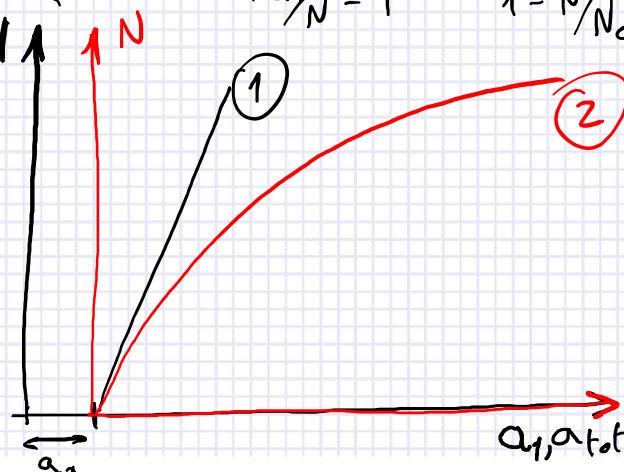
$$M = M_{\text{lin}} \cdot \frac{1}{1 - N/N_{CR}}$$

2^{ème} ordre

$$w_o(x) = a_0 \cdot \sin \frac{\pi x}{L} \quad (1^{\text{er}} \text{ mode})$$

$$\text{on remplace } N_{CR} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

$$w(L/2) = a = \frac{a_0}{N_{CR}/N - 1} = \frac{a_0 N/N_{CR}}{1 - N/N_{CR}}$$

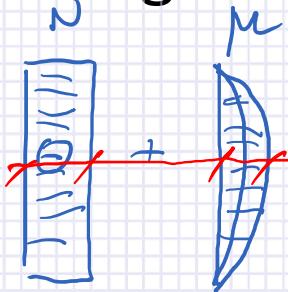


$$M_{\text{lin}} = N \cdot a_0$$

Annexe: Démonstration formule courbes de flambage 1

Section à mi-hauteur sans Nult

$$\sigma = \frac{N_{ult}}{A} + M_{max} \cdot \frac{Z}{I_y} = f_y$$



$$M_{max} = N_{ult} \cdot \frac{a_0}{1 - N_{ult}/N_{CR}}$$

$$\left| \frac{N_{ult}}{A \cdot f_y} + \frac{N_{ult}}{N_{pl}} \cdot \frac{a_0}{1 - \frac{N_{ult}}{N_{CR}} \frac{N_{pl}}{N_{pl}}} \cdot \frac{Z \cdot A \cdot f_y}{I_y \cdot f_y} = 1 \right. \quad \text{ajout } N_{pl}$$

On pose $\chi_R = N_{ult}/N_{pl}$ $\bar{\lambda}_K = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{CR}}} = fct(A, I_y, L, \dots)$

$$\chi_K + \chi_R \frac{1}{1 - \chi_R \cdot \bar{\lambda}_K^2} \frac{A \cdot a_0 \cdot Z}{I_y} = 1$$

Annexe: Démonstration formule courbes de flambage 2

$$(1 - \chi_K) \left(1 - \chi_K \cdot \frac{\bar{\lambda}_K^2}{\bar{\lambda}} \right) = \frac{A \alpha_0 \cdot z}{I_q} \cdot \chi_K$$

Hyp. : $M = \alpha_K (\bar{\lambda}_K - \bar{\lambda})$

$$\rightarrow 1 - \chi_K \cdot \frac{\bar{\lambda}_K^2}{\bar{\lambda}} - \chi_K + \chi_K^2 \cdot \frac{\bar{\lambda}_K^2}{\bar{\lambda}} - M \chi_K = 0$$

\rightarrow équ. 2ème degré :

$$\chi_K = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 \bar{\lambda}_K^2}}$$

$$\phi = \frac{1}{z} (1 + \gamma + \bar{\lambda}_K^2)$$

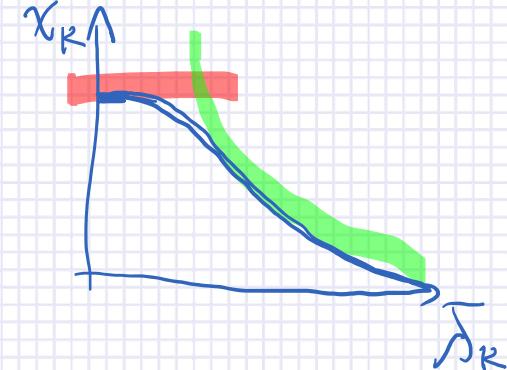


Fig. 10.5: Différents modes de flambage

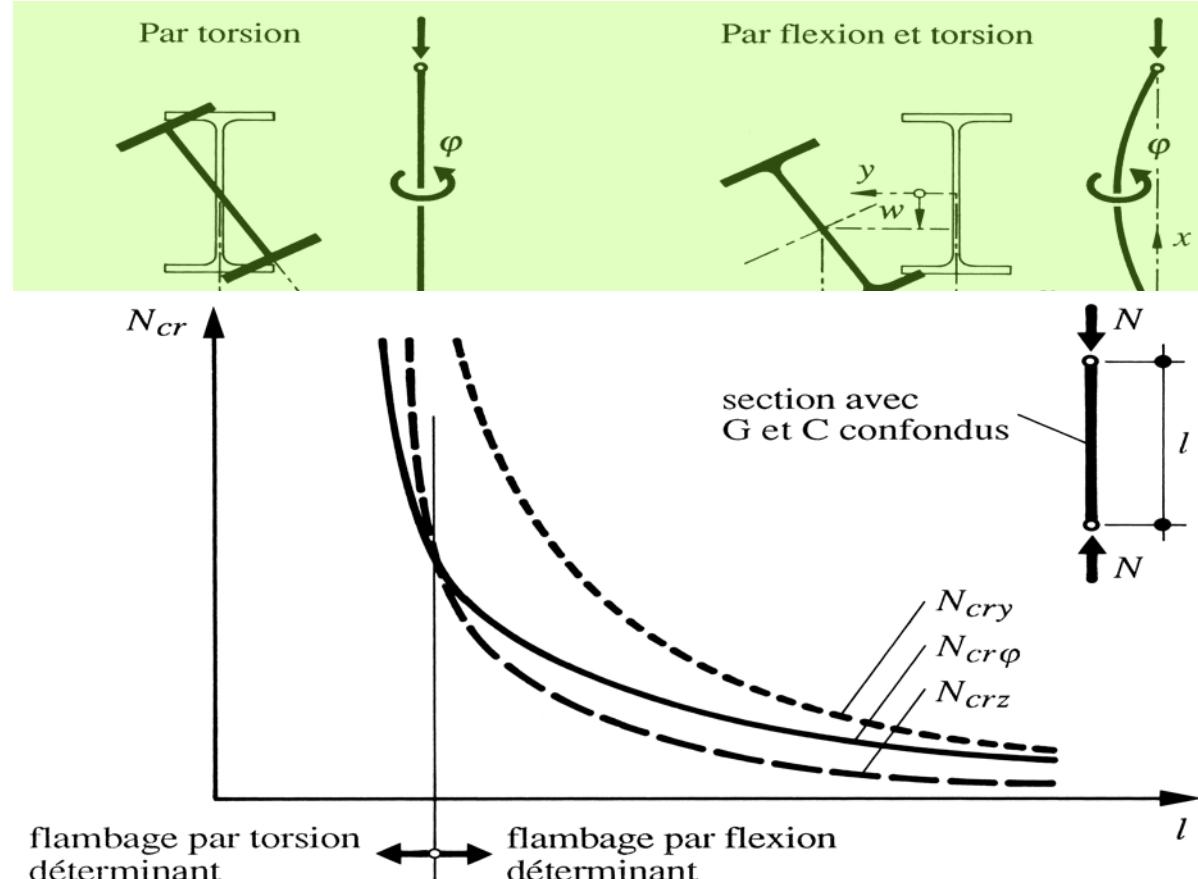
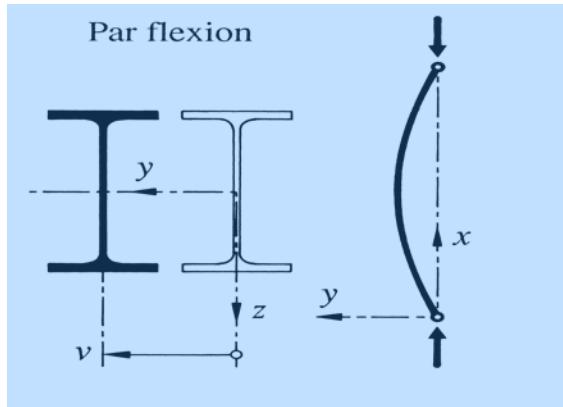
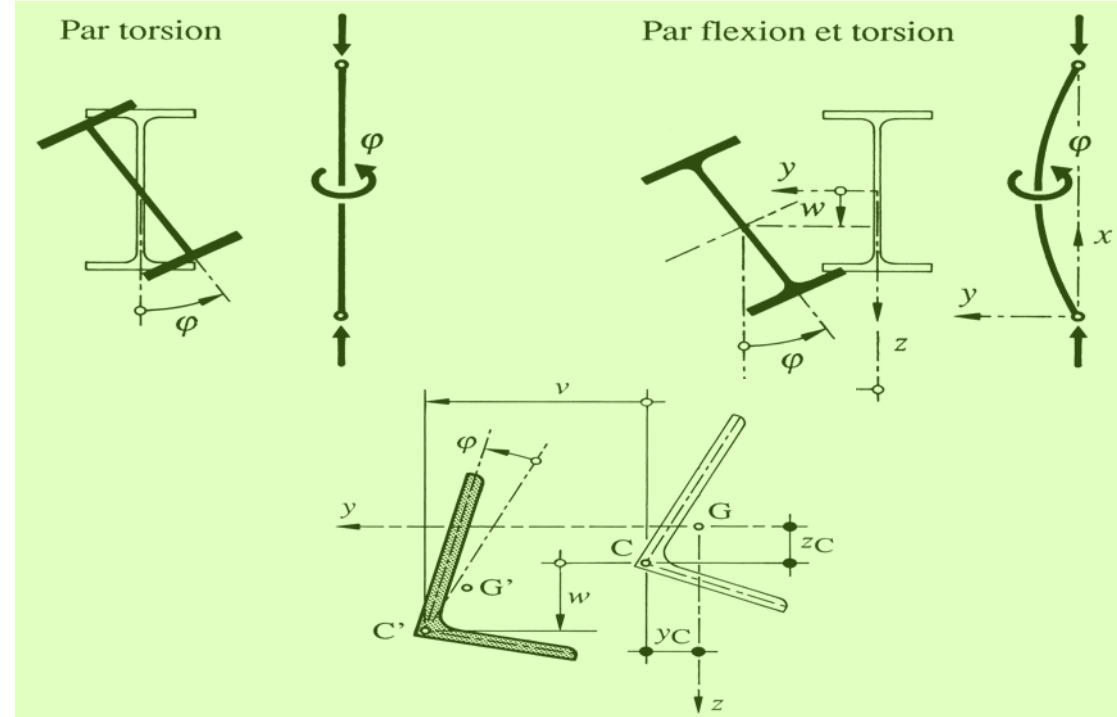
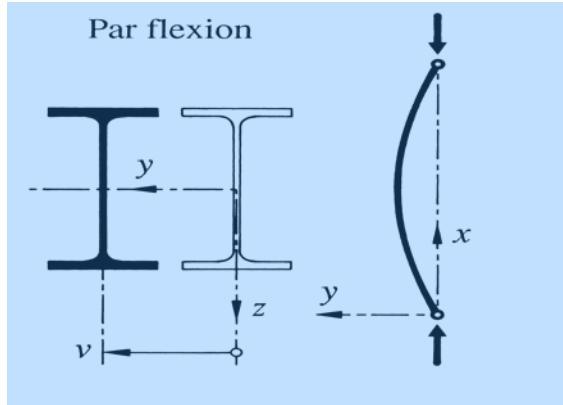


Fig. 10.5: Différents modes de flambage : flexion-torsion

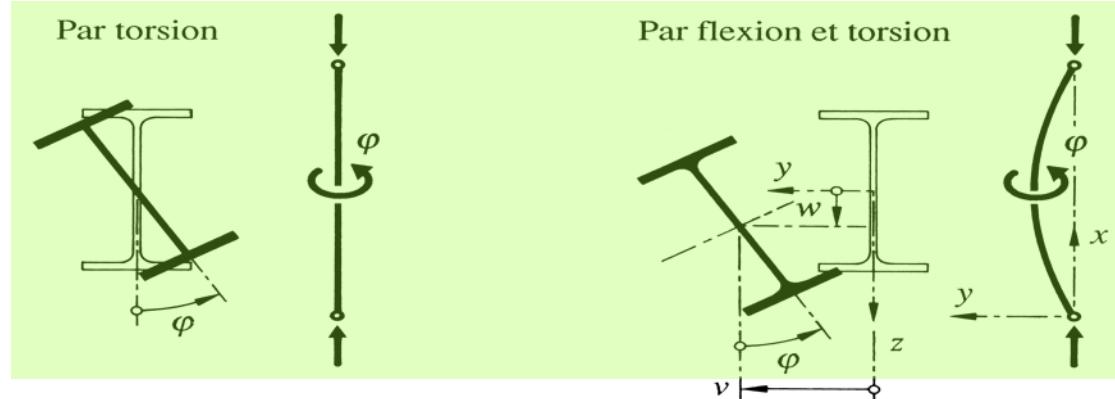


Cas générique,
système de 3 équ. différentielles couplées qui en s'intégrant:

$$i_C^2(N_{cr} - N_{crz})(N_{cr} - N_{cry})(N_{cr} - N_{cr\varphi}) - N_{cr}^2 z_C^2 (N_{cr} - N_{cry}) - N_{cr}^2 y_C^2 (N_{cr} - N_{crz}) = 0$$

Fig. 10.5: Différents modes de flambage : flexion-torsion

C et G confondus, quel profilé ?



$$i_c^2 (N_{cr} - N_{crz}) (N_{cr} - N_{cry}) (N_{cr} - N_{cr\varphi}) - N_{cr}^2 z_C^2 (N_{cr} - N_{cry}) - N_{cr}^2 y_C^2 (N_{cr} - N_{crz}) = 0$$

Le système devient ?

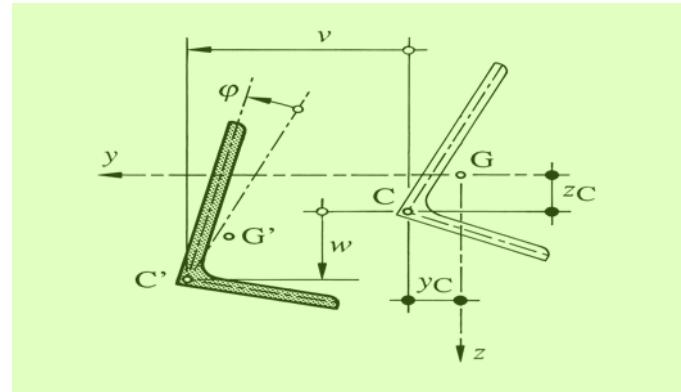
$$(N_{cr} - N_{crz}) (N_{cr} - N_{cry}) (N_{cr} - N_{cr\varphi}) = 0$$

$$N_{cry} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{ky}^2}$$

$$N_{crz} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{kz}^2}$$

$$N_{cr\varphi} = \frac{1}{i_c^2} \left(GK + \frac{\pi^2 EI_\omega}{L_{k\varphi}^2} \right)$$

Fig. 10.5: Différents modes de flambage : flexion-torsion



Un axe de symétrie seulement = cornières

Le système devient ?

$$(N_{cr} - N_{crz}) \left[i_C^2 (N_{cr} - N_{cry}) (N_{cr} - N_{cr\varphi}) - N_{cr}^2 y_C^2 \right] = 0$$

4 charges critiques à déterminer, dont le N_{cr} de l'équ. ci-dessus (qui correspond au mode en flexion-torsion).

$$i_C^2 = y_c^2 + z_c^2 + (I_y + I_z)/A$$