

COURS
STRUCTURES EN MÉTAL
2025

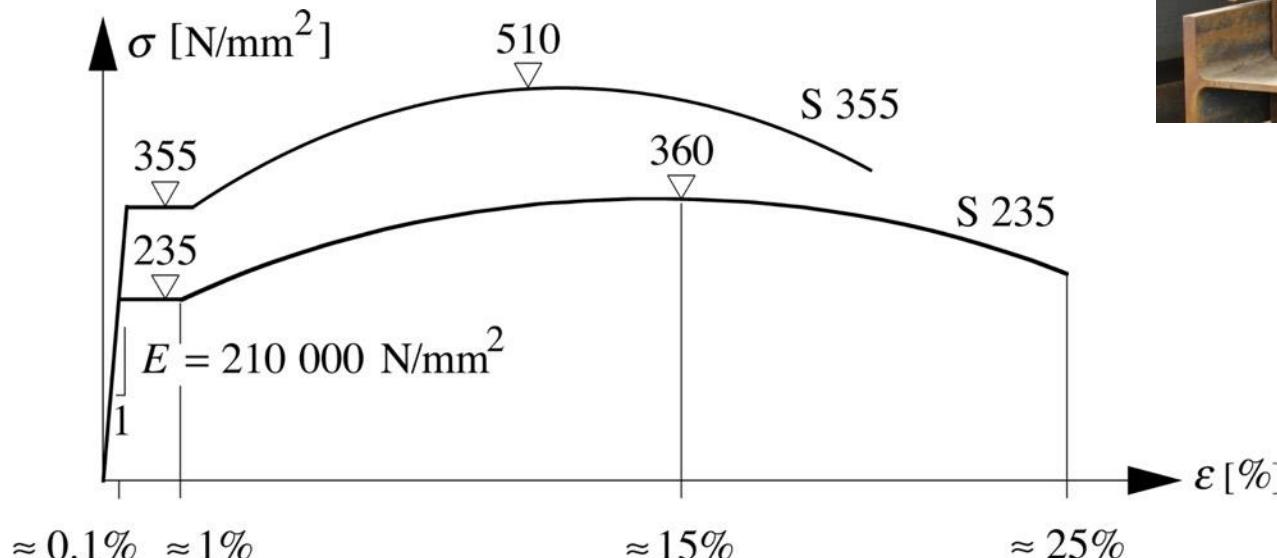
L'essentiel à retenir ...
pour la suite et votre profession

- Capacité à restituer les principes et modèles de calcul qui régissent le comportement structural des éléments en acier
- Utiliser les modèles de calcul pour dimensionner des éléments en acier, avec comme points forts la stabilité et les assemblages
- Faire des hypothèses et choix intelligents pour le dimensionnement – préparation pour les projets, construire quelque chose – et savoir travailler de manière autonome et efficace
- Utiliser les outils du praticien, normes et tables de dimensionnement, suisses (les normes contiennent aussi des erreurs, ne pas appliquer sans comprendre).

Structural

→ **S 355 K2** + particularités

Nuance = f_y Résilience, très ductile si temp > T_{trans}



IPE
HEA
UNP
LNP
ROR
RRW

ACIER:

Masse volumique:

$$\rho_a = 8 \text{ to/m}^3$$

...

Coefficient de Poisson:

$$\nu = 0.3$$

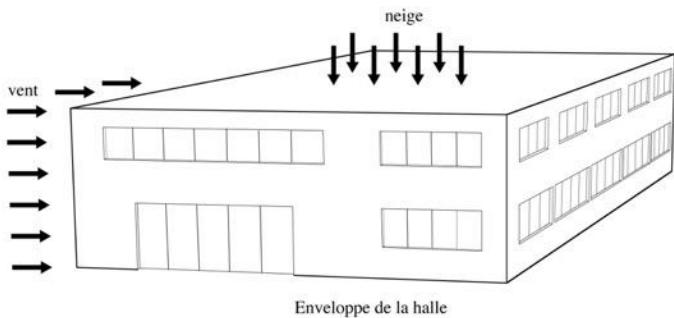
Coefficient de dilatation thermique:

$$\alpha_T = 10 \cdot 10^{-6}/^\circ \text{C} (= 10 \text{ mm pour } 10^\circ \text{C et } 100 \text{ m})$$

BETON :

résistance, module = 1/10 de l'acier

Effets d'actions, combinaisons, principe de vérification

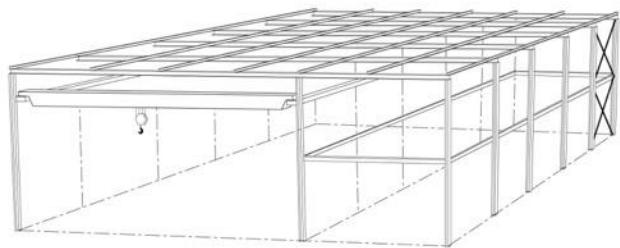


$$E_d \leq R_d$$

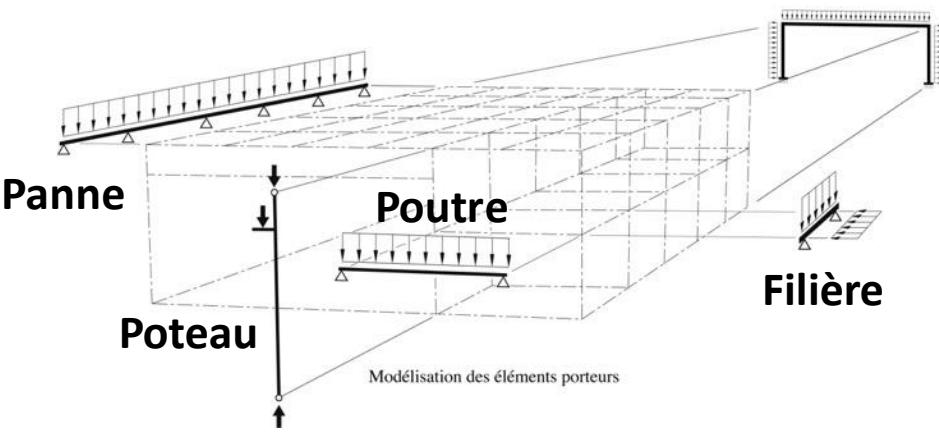
$$E(\gamma_G \cdot G_k, \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1}, \psi_{0i} \cdot Q_{ki}) \leq R_k / \gamma_M$$

Séparation en éléments simples, portant essentiellement dans une direction. Descente de charge Vert.:

- Panneaux de toiture (dalle)
- Panne (soline)
- Traverse (sommier), cadre
- Poteau, fondations



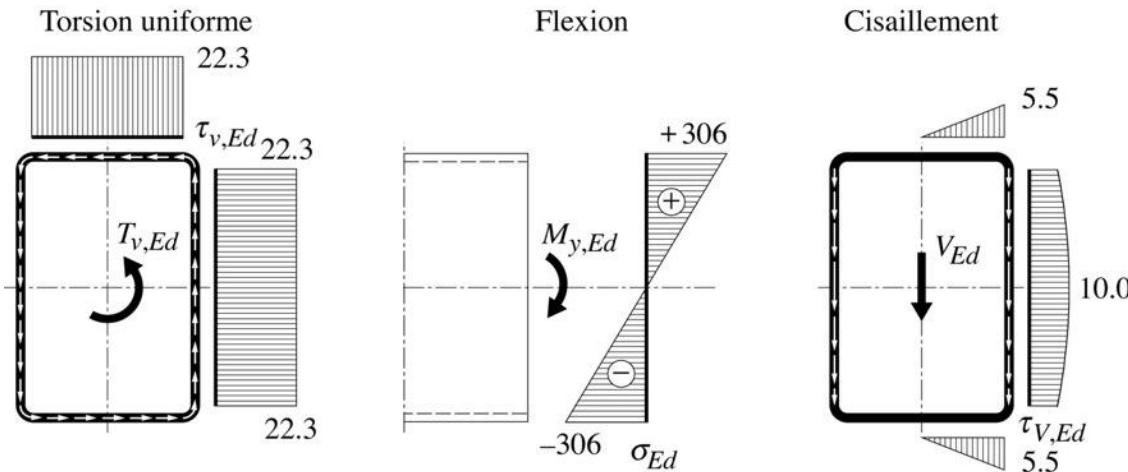
Cadre



Descente de charge Horizontales:

- Façade
- Filière
- Poteau, traverse (montant pignon, panne)
- CV horizontal
- CV vertical
- Fondations

Sans instabilités

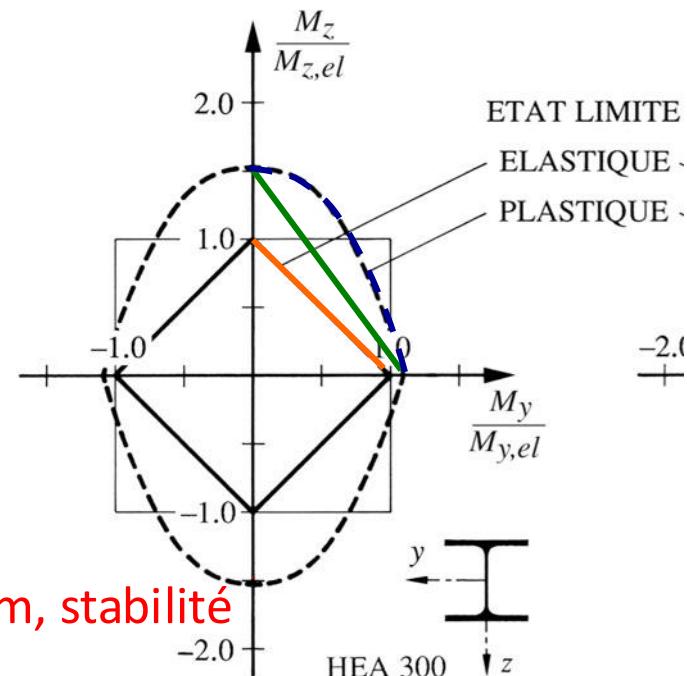


Elastique (von Mises):

$$\sigma_{Ed} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

Interaction linéaire:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,el,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,el,Rd}} \leq 1.0$$



Plastique, linéaire ou courbe plus favorable (profilés tubulaires, profils double-té):

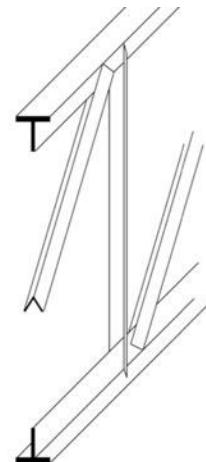
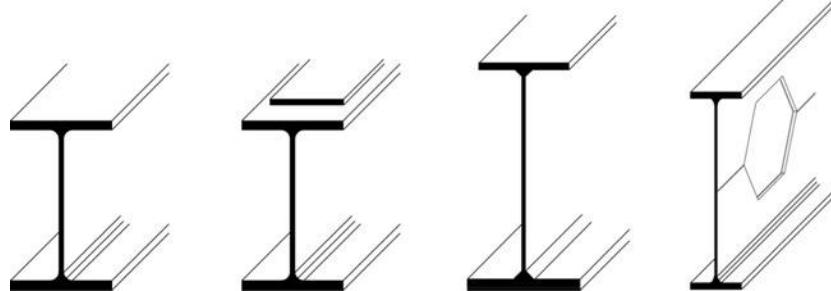
par exemple:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1.0$$

σ résiduelles n'influencent pas résistance, mais déform, stabilité
ATTENTION aux instabilités, dias suivantes

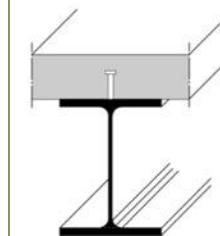
Méthodes de dimensionnement, dimensionn. d'éléments

Hyp. : - section indéformable
- méthode fct classe de section



Mixte: pas traité en 2025

- Transform. béton en acier équiv.: n_{el} , n_{pl}
- Nécessité d'une connexion



Tab. avec formules
 z_b , I_b , $W_{pl,b}$

Tableau 4: Classification des sections

Classe de section	Détermination des efforts intérieurs	Détermination de la résistance ultime des sections	Méthode	Critères d'élancement Pour empêcher le voilement
1	plastique	plastique	PP	tableaux 5a et 5b
2	élastique	plastique	EP	tableaux 5a et 5b
3	élastique	élastique	EE	tableaux 5a et 5b
4	élastique	élastique réduit	EER	chiffre 4.5.4

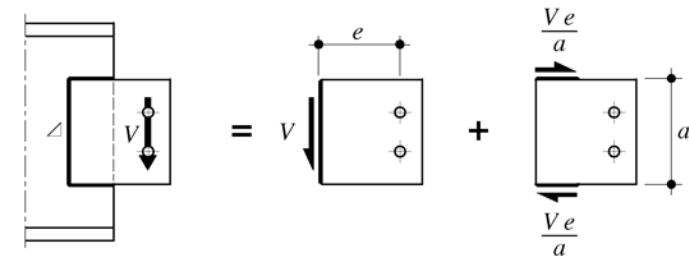
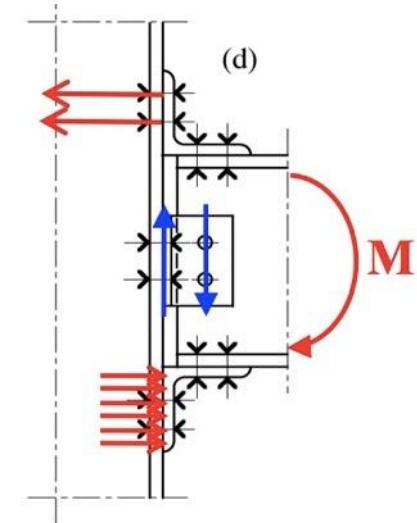
Pas traité

Assemblages, questions à se poser

- Cohérence entre système statique structure et fonctionnement des assemblages
(rotule ou non, selon quelle direction, comment la réaliser)
- Modèles de transmission des forces dans les assemblages
- Dimensionn. puis vérif. de tous les éléments de transfert, dans toutes les sections traversées par les efforts
- Dispositions constructives
- ELU, aussi ELS (rigidité en service ? HR précontraint ?)

Plaques et goussets, ne pas oublier :

- Limiter les **excentricités**, en tenir compte
- Plaque de tête, épaisseur t_p , déformable, **effet de levier** ? En tenir compte ou $t_p \nearrow$
- Gousset, diffusion des efforts à 30° (découle de St-Venant: dist. des contraintes modifiée uniqu. près point application de charge)
- Plaque/gousset comprimé, élancement, **instabilité** ? Selon Tab 5a
- Introduction forces dans profilés, indéformabilité section, (méthodes et vérif. pas traitées) **donc mettre raidisseurs**



Théories lin.-élastique

Système parfait

Matériau ∞ lin.-élastique

Instabilité par bifurcation

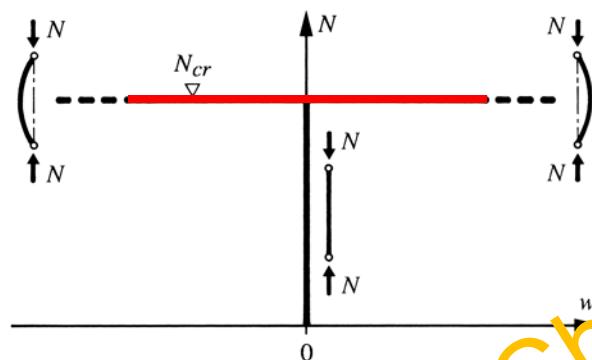


Résistances ultimes

Système réel imparfait

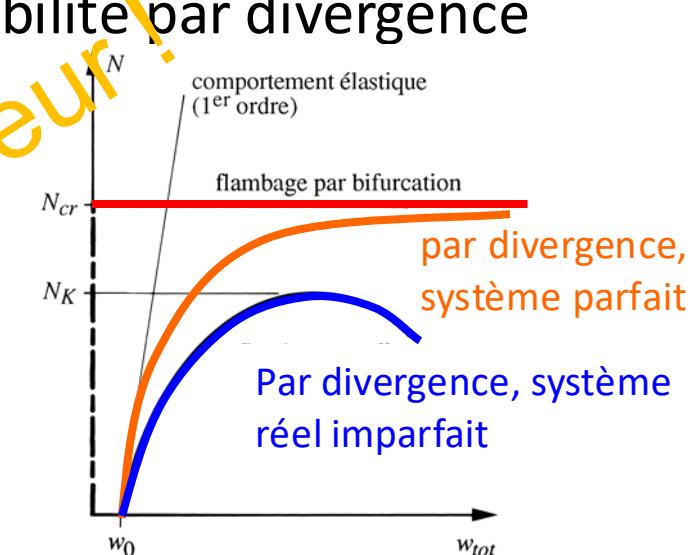
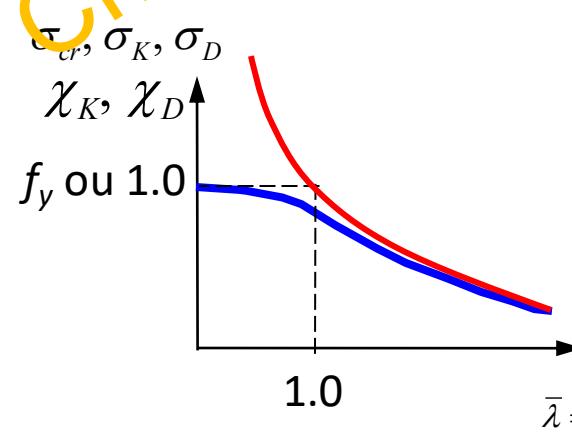
Matériau réel (élast.-plast.)

Instabilité par divergence



N_{cr} (Euler)

M_{crD}



$N_{K,Rd}$
 $M_{D,Rd}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Rd}}{N_{cr}}}, \sqrt{\frac{M_{Rd}}{M_{crD}}}$$

Prise en compte des phénomènes d'instabilité dans dimensionn. d'éléments faisant partie de structures

- Les nœuds sont-ils des points fixes dans le plan, l'espace ?
- Utilisation système de stabilisation aux efforts horizontaux (besoin que de 1 à 3% de la force de compression pour créer un point fixe)
- Efficacité des mesures : ajout d'appuis intermédiaires, forme section, ...

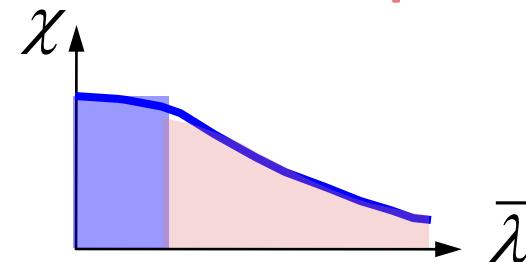
Flambage

$(\bar{\lambda}_{kz} : \text{critère peut être relaxé à 0.5})$

Empêché

$$\bar{\lambda}_k \leq 0.2$$

Non-empêché



Par ex. biaxial:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{\omega_y}{1 - N_{Ed}/N_{y,cr}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{D,Rd}} + \frac{\omega_z}{1 - N_{Ed}/N_{z,cr}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1.0$$

Déversement

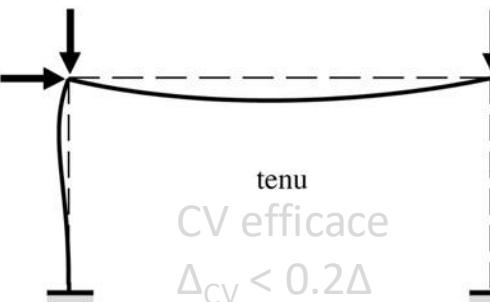
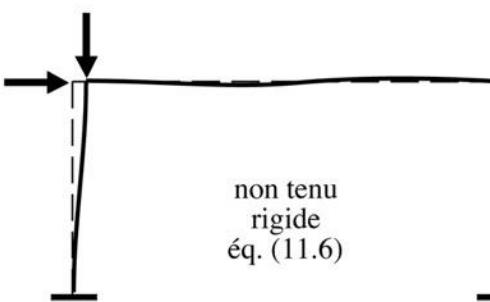
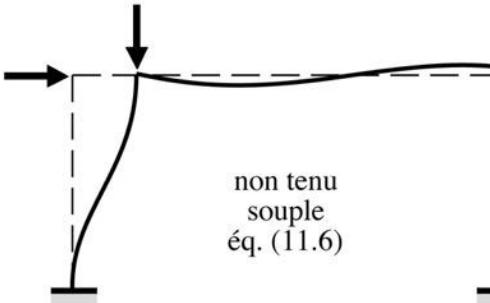
$$\bar{\lambda}_D \leq 0.4$$

$$l_D \leq l_{cr, \text{méthode}}$$

$$\frac{\omega_y \square M_{y,Ed}}{\square M_{y,red,Rd}}^\beta + \frac{\omega_z \square M_{z,Ed}}{\square M_{z,red,Rd}}^\beta \leq 1.0$$

En fonction de $N_{k,Rd}$, $M_{D,Rd}$

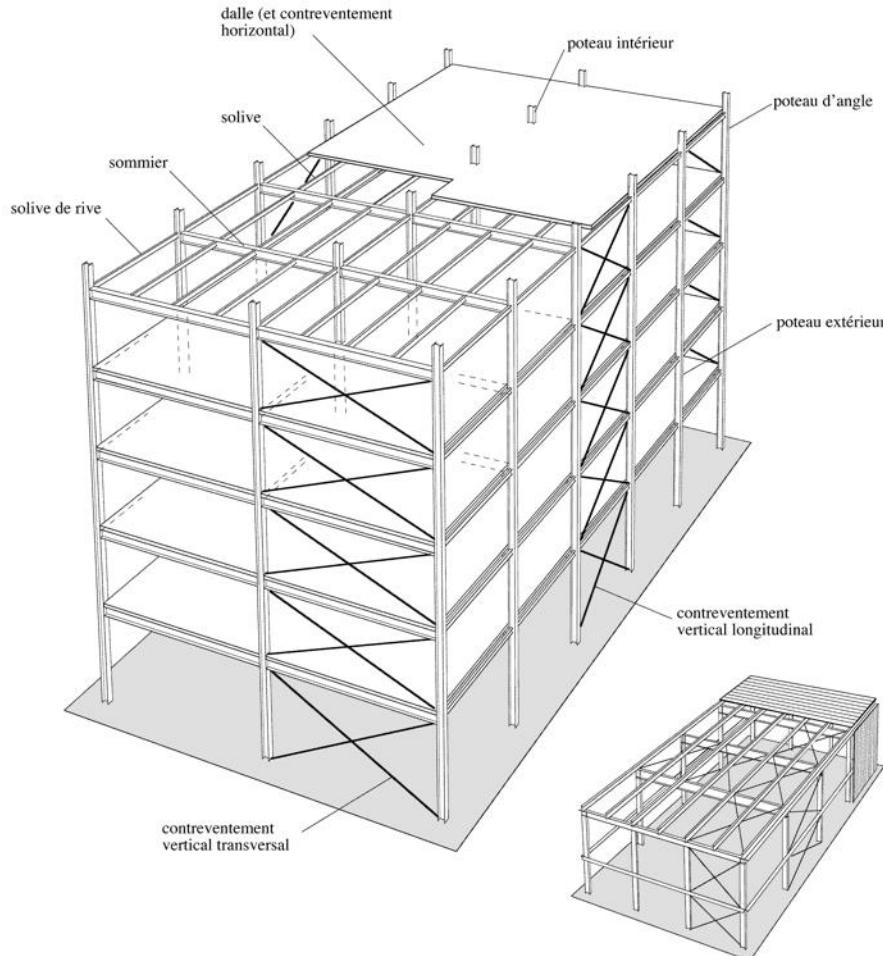
Stabilité de cadres et Stabilisation de structures

Type de cadre	Type de calcul des efforts intérieurs	
 <p>tenu CV efficace $\Delta_{cv} < 0.2\Delta$</p>	<p>CV tjs admis Efficace dans ce cours</p> <p>premier ordre (§11.5.3)</p> <p>élastique</p> <p>plastique $(\bar{\lambda}_K \leq 0.40 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}})$</p>	<p>Critère 1: tenu ou non ?</p> <p>$\Leftrightarrow h_k \leq h$</p>
 <p>non tenu rigide éq. (11.6)</p>  <p>non tenu souple éq. (11.6)</p>	<p>premier ordre (§11.5.3)</p> <p>élastique</p> <p>plastique $(\bar{\lambda}_K \leq 0.32 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}})$</p> <p>Crit. 2a: Stabilité</p> $\alpha_{cr,2a} = \frac{Q_{cr}}{Q_{Ed}} = \frac{\sum N_{cr,i}}{\sum N_{Ed,i}} \geq 10$ <p>second ordre (§11.5.4)</p> $\alpha_{cr} < 10$ <p>Ou crit. 2b: rigidité latérale</p> $\alpha_{cr,2b} = \frac{h}{u} \frac{\sum H_{Ed} + H_\phi}{\sum Q_{Ed}} \geq 10$ <p>Amplification des moments (ou longueurs de flambage, ou calcul direct avec imperf. par FEM)</p>	<p>Critère 2: Rigide ou souple ?</p> <p>$\Leftrightarrow h_k \geq h$</p> <p>Rigide</p> <p>Souple PAS TRAITE</p>

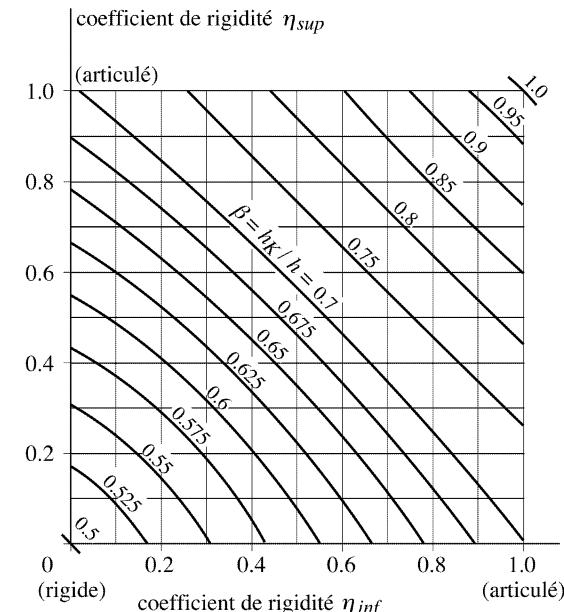
*Voir aussi tableau 11.33

Stabilité de cadres et Stabilisation de structures

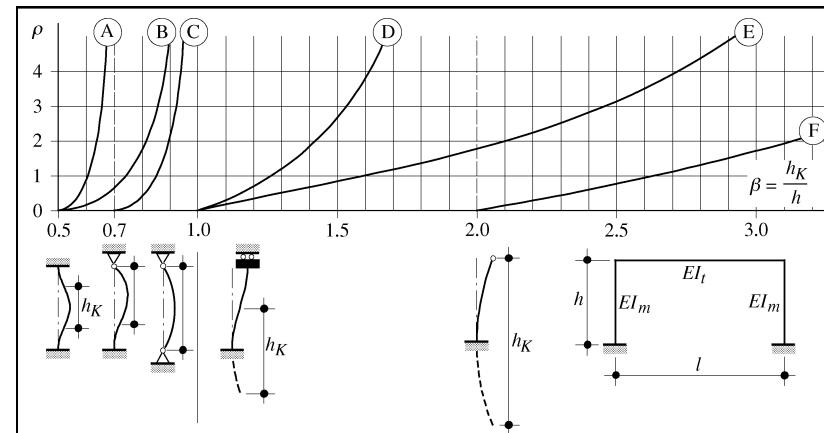
- Toitures et planchers: plaques ou CV horizontaux
- CV de façades: - Min. trois lignes d'action de forces
 - Non-concourantes en un point
 - Pas toutes parallèles



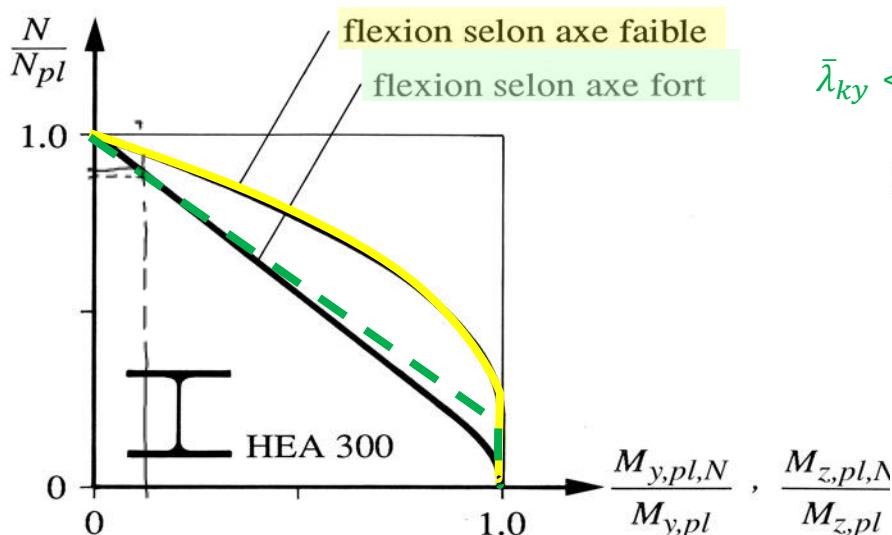
$$h_k = \beta \square h$$



(a) Mode à nœuds fixes

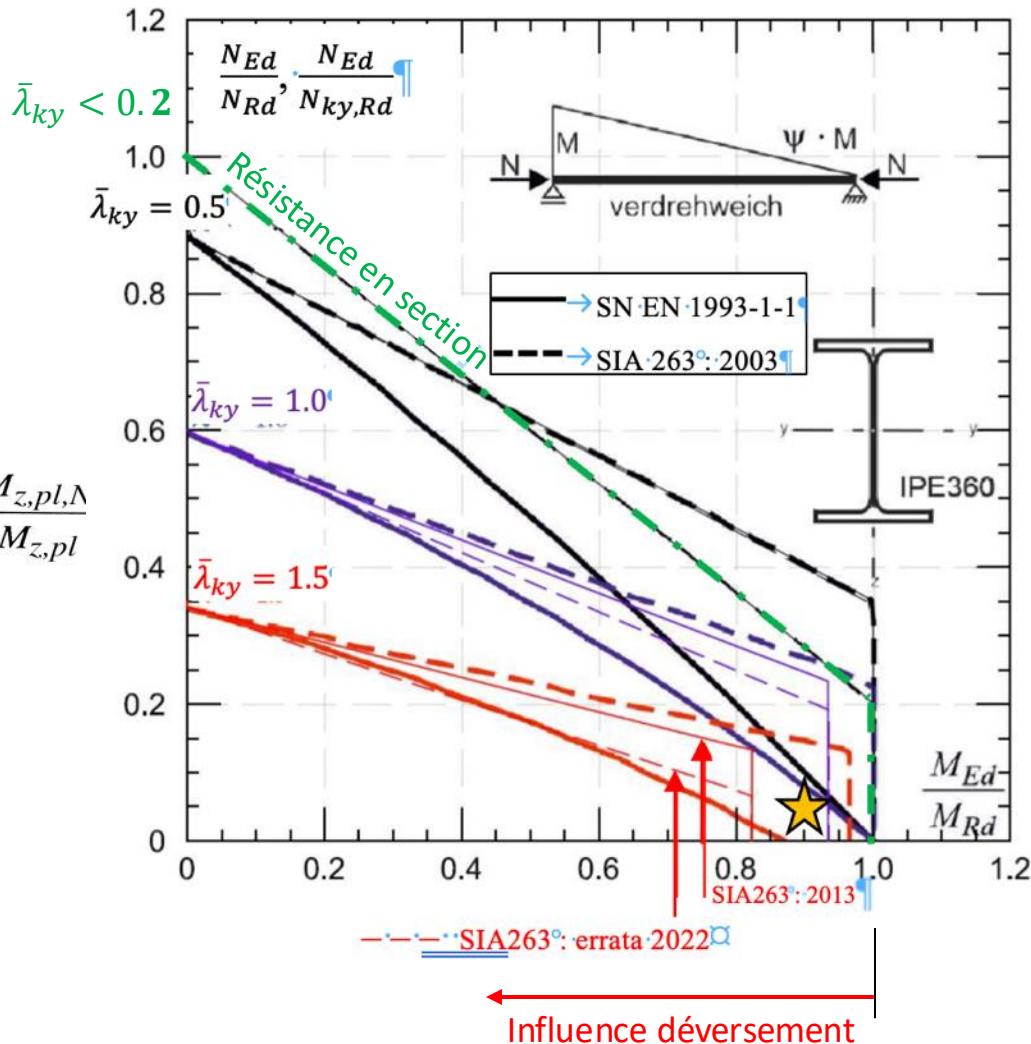


Résistance en section



(b) Profilé en double té.

+ Stabilité \Leftrightarrow fct($\bar{\lambda}_{ky}$, dévers.)



ELEMENT (cadres à nœuds fixes = tenu):

Formule interaction:
SIA 263, equ. (49)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{1}{1 - N_{Ed} / N_{cr}} \frac{\omega \square M_{Ed,max}}{M_{Rd}} \leq 1.0$$

$\omega = \omega_y < 1$ et déversement non-empêché, utiliser $M_{Rd} = M_{D,Rd}$

Et aussi effectuer la vérif. en section (avec N_{Rd} et $M_{y,Rd}$)

Si flambage selon l'autre plan non-empêché, voir formules (50)(51) qui couvrent les cas d'interaction flexion-torsion, règles EC3 sont plus complètes.
(ou alors vérif. 2^{ème} ordre direct avec e_0, M_{Ed})

Autres cas: SIA 263 § 5.1.9.1 et § 5.1.10.3

(49), (50), (51)

Pour des barres chargées transversalement ou des montants de cadres libres latéralement, la formule peut également être employée avec ω égal à 1. Pour les cadres libres latéralement, il faut prendre les longueurs de flambage $L_K \geq h$ correspondantes.

CADRE/ELEMENT (cadres à nœuds déplaçables = non-tenu):

SIA 263 § 5.1.9.1

Pour des barres chargées transversalement ou des montants de cadres libres latéralement, la formule (49) peut également être employée avec ω égal à 1. Pour les cadres libres latéralement, il faut prendre les longueurs de flambage $L_K \geq h$ correspondantes.

Formule interaction APPROCHE I:

SIA 263, equ. (49)

SIA, non-tenu rigide
(si souple, attention !)

APPROCHE II: Vérif. en section
(calcul 2^{ème} ordre direct, avec φ, e_0):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{1}{1 - N_{Ed}/N_{cr}} \frac{M_{Ed,max}}{M_{Rd}} \leq 1.0$$

1^{er} ordre
Mode à nœuds déplaçables !
Effets P- δ et P- Δ confondus
(formulation Eurocode meilleure)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{\mathcal{M}_{\varphi, e_0, Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0$$

Errata 2022, formules (50) et (51) Flambage hors plan et déversement pas empêchés

- 5.1.10.1 Dans le cas de barres à section constante, sollicitées en compression et en flexion selon les deux axes, la vérification de la stabilité peut être effectuée selon la formule:

$$\frac{N_{ky,Rd}}{N_{K,Rd}} \text{ ou } \frac{N_{ky,Rd}}{N_{kz,Rd}} + \frac{\omega_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{D,Rd}} + \frac{\omega_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1,0 \quad (50)$$

- 5.1.10.2 Dans le cas de sections I bisymétriques et de profilés creux rectangulaires laminés, sollicitées en compression et en flexion selon les deux axes, si le flambage hors du plan et le déversement ne sont pas empêchés, la vérification de la stabilité peut être effectuée selon la formule d'interaction suivante:

$$\left(\frac{\omega_y M_{y,Ed}}{M_{y,red,Rd}} \right)^\beta + \left(\frac{\omega_z M_{z,Ed}}{M_{z,red,Rd}} \right)^\beta \leq 1,0 \quad (51)$$

$M_{D,Rd}$ valeur de calcul du moment de déversement selon le chiffre 4.5.2 avec un moment constant sur toute la longueur de la barre dans le cas d'une flexion selon les deux axes, avec la répartition effective des moments dans le cas d'une flexion selon un axe

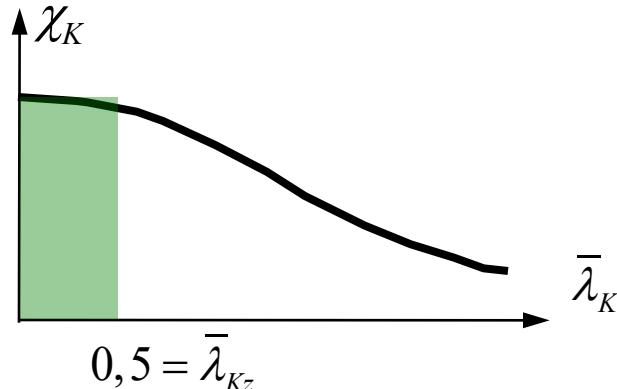
$M_{D,Rd,min}$ valeur de calcul du moment de déversement avec un moment constant
 $N_{k,Rd}$ le minimum des 2 valeurs $N_{ky,Rd}$ et $N_{kz,Rd}$

Conservateur

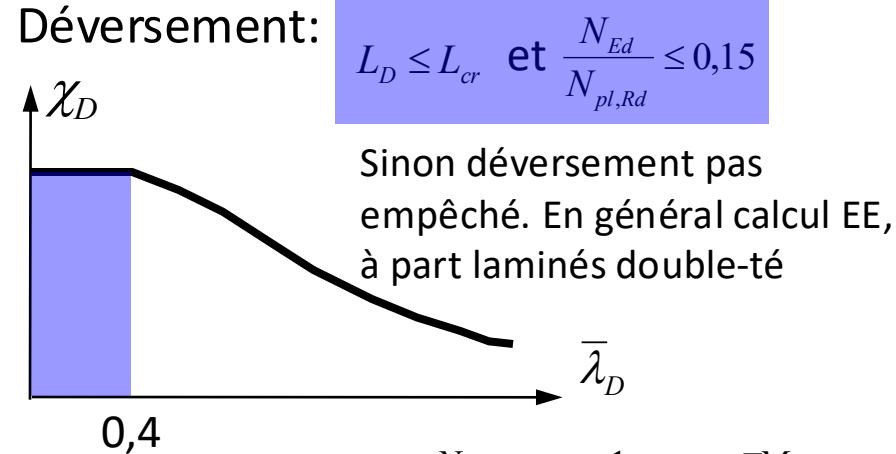
ω_y coefficient relatif à la répartition des moments selon l'axe y. Pour des poutres susceptibles de déversement ($M_{D,Rd} < M_{y,Rd}$) et utilisation simultanée de $N_{Kz,Rd}$, on appliquera $\omega_y = 1,0$. Dans tous les autres cas, les coefficients selon le chiffre 5.1.9.1 s'appliquent.

Résumé utilisation des formules d'interaction N + M

Flambage :



Déversement:



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

Sinon déversement pas empêché. En général calcul EE, à part laminés double-té

Elément $\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{1}{1 - N_{Ed}/N_{cr}} \frac{\omega \square M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1.0$

Flambage hors plan empêché et déversement empêché, classes 1 et 2:

- Tout profilé \longrightarrow SIA 263, équ. (49) et, si nécessaire (44) En section

- Double té bisymétrique \longrightarrow SIA 263, § 5.1.9.2 et (45)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1.0$$

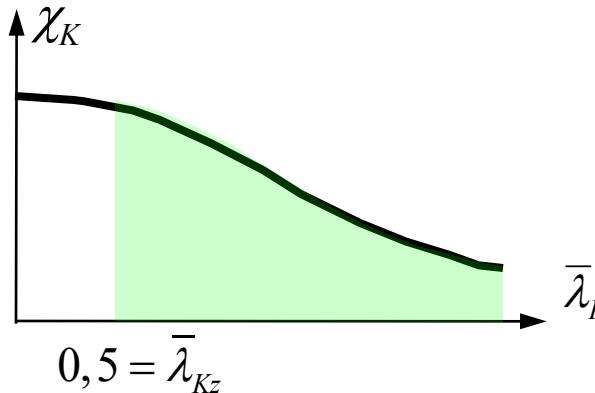
$$\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{1}{1 - N_{Ed}/N_{cr}} \frac{\omega \square M_{Ed}}{\xi \square M_{Rd}} \leq 1.0$$

$$M_{y,Ed} \leq M_{y,N,Rd} = M_{y,Rd} \square \xi \square 1 - \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq M_{y,Rd}$$

Classe 3: élastique, réduction correspondante des moments résistants
(Classe 4: formules exprimées en contrainte limite, à la place d'efforts)

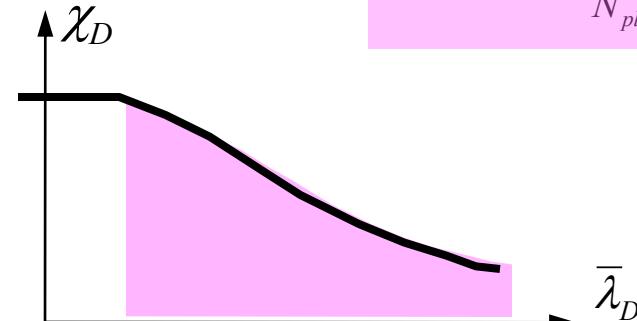
Résumé utilisation des formules d'interaction N + M

Flambage :



$$0,5 = \bar{\lambda}_{Kz}$$

Déversement:



$$L_D > L_{cr} \text{ ou } \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} > 0,15$$

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

Elément

$$\frac{N_{Ed}}{N_{k,Rd}} + \frac{\omega_y}{1 - N_{Ed}/N_{y,cr}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{D,Rd}} + \frac{\omega_z}{1 - N_{Ed}/N_{z,cr}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1.0$$

En section

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1.0$$

Flambage et déversement non-empêchés, classes 1 et 2:

- Tout profilé \longrightarrow SIA 263, équ. (50) et, si nécessaire (44)
- Double té bisymétrique \longrightarrow SIA 263, équ. (51) et ((45) ou (48))

$$\frac{\omega_y M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{\omega_z M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1.0$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}^2 + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}^2 \leq 1.0$$

Voir sur Moodle

- Séance réponses aux questions avant examen:
ve 27 juin, 14h-16h, salle GC B1 10
(ou via Zoom : Meeting ID 556 810 7589)
- Le forum reste ouvert jusqu'à la séance Q/A
- Liste sujets et exemples numériques (sans la partie théorique et les exemples interrogés lors de l'examen intermédiaire)
- Conditions d'examen (résumé, 2 feuilles au lieu de 1)

FIN DU COURS

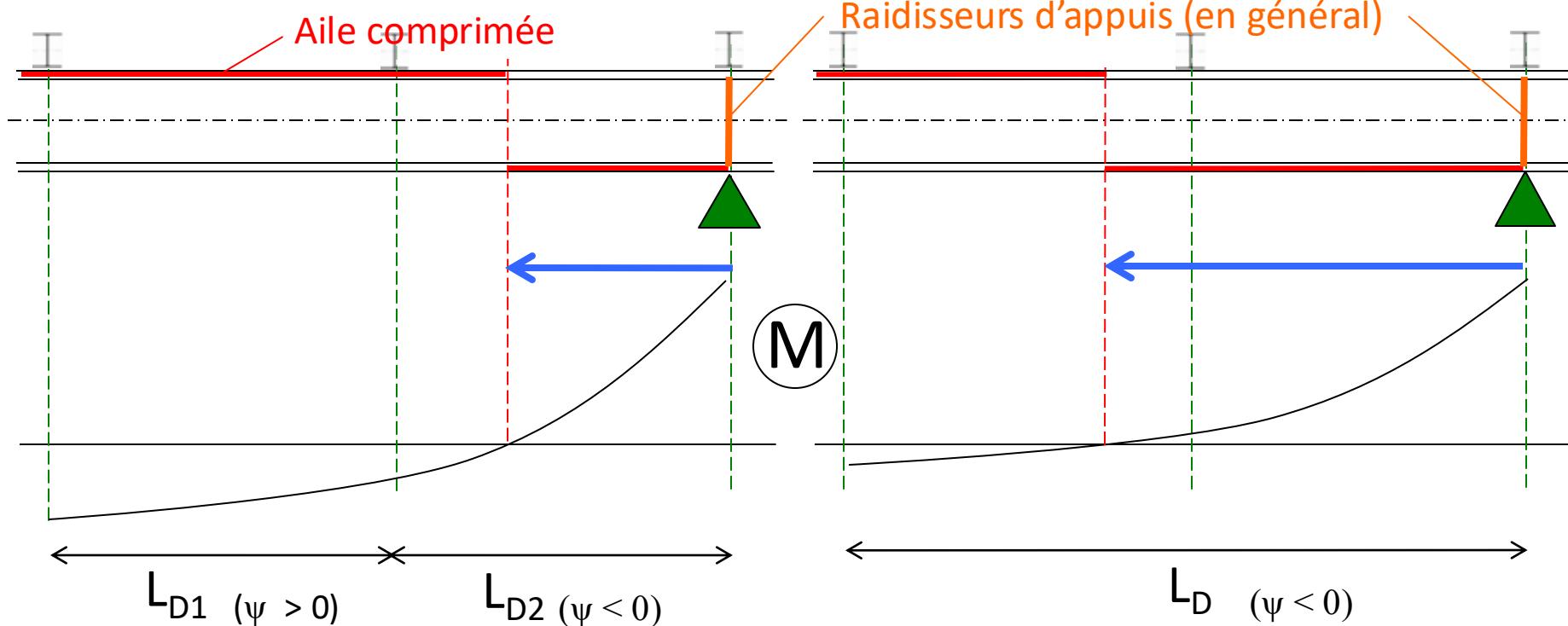
ANNEXES

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

Changement de signe de moment
avant l'appui suivant

Changement de signe de moment
après l'appui suivant

Support latéraux (aile sup. tenue directement, ponctuellement)



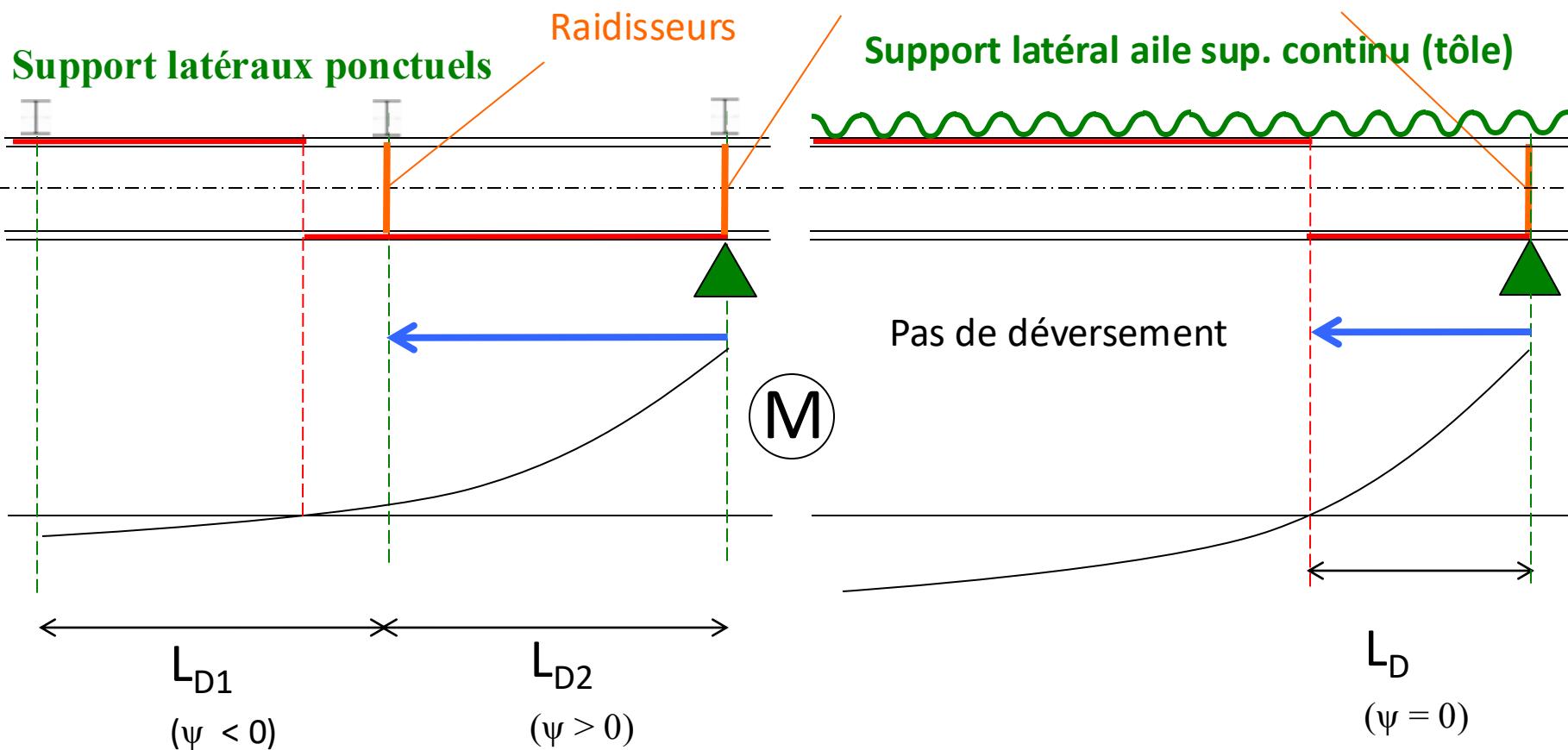
Résistance: $L_D \leq L_{cr}$ ou $\bar{\lambda}_D \leq 0.4$ $M_{y,Rd} = M_{y,classe}$

$$\bar{\lambda}_D > 0.4$$

$$M_{D,Rd} = \frac{\chi_D \square W_{y,classe} \square f_y}{\gamma_{M1}}$$

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

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



Assemblages (par ex. couvre-joints):

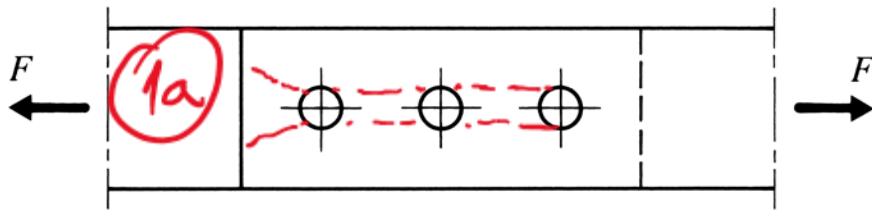
- en général, section nette contrôle (largeur plaque min, e_2 , p_2)
- sinon, arrachement de bloc

Goussets:

- largeur & épaisseur plaque non définies, pour les trouver \Rightarrow diffusion à $\pm 30^\circ$
- plus réaliste, favorable aussi, que de prendre e_2

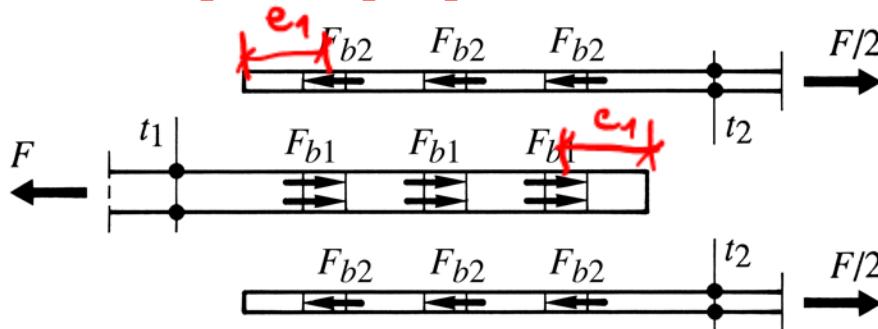
Pression latérale (Fig 8.13 et 8.17): 2 modes de rupture

CONTACT ENTRE BOULONS & PIECES



Hyp.:
Acier plaque \leq Acier boulons
 f_u déterminant

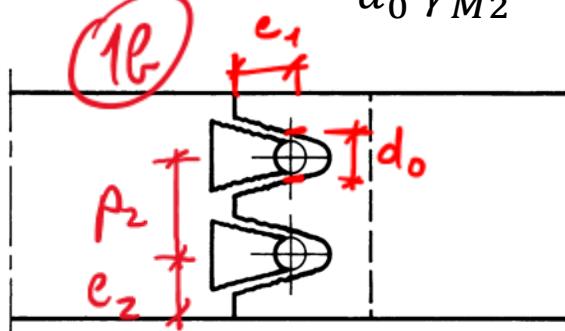
Equilibre par pression latérale



1) Arrachement pince

2) Ovalisation trous

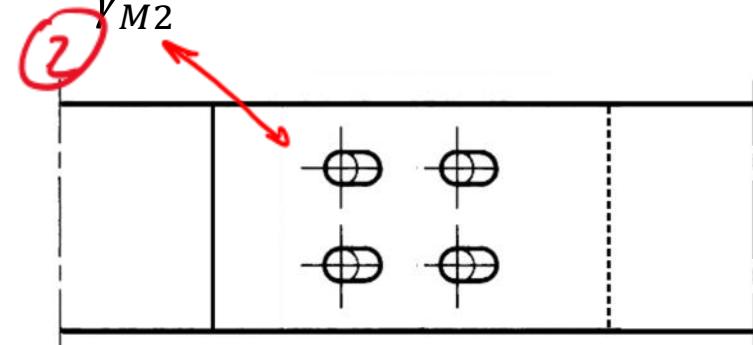
$$F_{b,Rd} = 0.85 \frac{e_1}{d_0} \frac{f_u}{\gamma_{M2}} dt \leq 2.4 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} dt \quad (8.9a)$$



Cours struc

Arrachement de la pince

Prof. A. I



Ovalisation des trous