

## Introduction

### Définitions du phénomène

Lorsqu'une poutre est soumise à une charge transversale locale agissant au niveau de la semelle supérieure, dans le plan de l'âme, la résistance de cette dernière doit être vérifiée vis-à-vis de deux modes de ruines locaux (cas que l'on rencontre dans les planchers à poutres superposées). Le premier est l'écrasement de l'âme par plastification, sans instabilité de l'âme. Le second mode concerne l'instabilité hors plan de l'âme sur toute sa hauteur. Ce phénomène correspond au voilement de l'âme, cette dernière étant maintenue par les semelles supérieure et inférieure.

### Principe de vérification

Les deux modes de ruines mentionnés ci-dessus sont traités conjointement dans la NF EN 1993-1-5 au chapitre 6 : « Résistance aux forces transversales ». La vérification est effectuée en s'assurant que la force transversale sous combinaisons de charges à l'ELU  $F_{Ed}$  est inférieure à la résistance de l'âme aux forces transversales  $F_{Rd}$  :

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1 \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.14)}$$

La résistance prend en compte les deux modes de ruines par l'intermédiaire de la longueur chargée efficace  $\ell_y$  et du coefficient réducteur de voilement local  $\chi_F$  :

$$F_{Rd} = \chi_F \ell_y \frac{f_{yw} t_w}{\gamma_{M1}} \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.1) \& (6.2)}$$

Avec :

$f_{yw}$	Limite d'élasticité de l'âme
$t_w$	Epaisseur de l'âme
$\gamma_{M1}$	Coefficient partiel de sécurité relatif aux instabilités

Dans le critère de vérification,  $\ell_y$  est associé à la ruine par plastification : moins la bande chargée est large, plus les contraintes se concentrent et donc plus le risque d'écrasement local augmente. En parallèle, le coefficient  $\chi_F$  prend en compte le risque d'instabilité via l'élançement de l'âme : plus l'âme est mince et haute, plus le risque de voilement est grand.

Pour un bâtiment,  $\gamma_{M1} = 1,00$  d'après la note 2B de la clause 6.1 (1) de la NF EN 1993-1-1.

### Domaine d'application

Selon la clause 6.1 (1) de la NF EN 1993-1-5, le domaine d'application de la norme se limite à des poutres à section en I, H ou caissonées, laminées ou soudées, dont la semelle comprimée est maintenue latéralement de manière appropriée. Cette dernière disposition assure que l'âme est maintenue en pied et en tête par ses deux semelles.

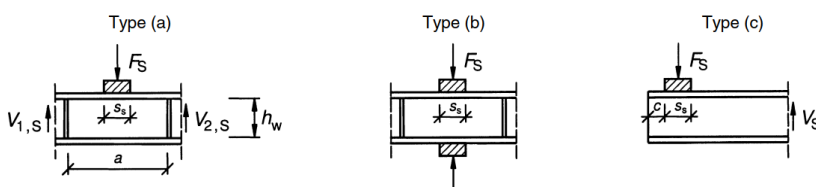
## Méthodologie de calcul

Dans la suite, les étapes de calcul aboutissant à la résistance de l'âme aux forces transversales sont détaillées.

### Application de la charge

#### 1<sup>re</sup> étape : choix du type d'application de la charge

La résistance de l'âme sous charge locale dépend du type d'application de la charge. La norme définit 3 types d'applications :



NF EN 1993-1-5 Figure 6.1

**Type (a)** : La force transversale, agit en travée de poutre et est équilibrée par les efforts tranchants de part et d'autre du point d'application. Ce cas est le plus fréquent.

**Type (b)** : La force transversale est directement transmise au niveau de la semelle opposée. Aucun effort tranchant n'est engendré dans la poutre.

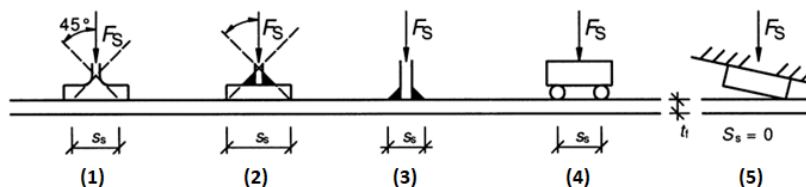
**Type (c)** : La force transversale agit à l'extrémité d'une poutre non raidie et est équilibrée par l'effort tranchant dans la poutre. Ce cas est, par exemple, rencontré lors de la vérification de l'âme au droit de la réaction d'appui d'une poutre dépourvue de raidisseurs.

Avec :

$h_w$	Hauteur de l'âme
$a$	Distance entre les deux raidisseurs intermédiaires adjacents
$c$	Distance au bord
$s_s$	Longueur d'appui rigide

#### 2<sup>e</sup> étape : détermination de la longueur d'appui rigide

La longueur d'appui rigide  $s_s$  dépend de la façon dont transite la force transversale au niveau de la semelle. Ainsi la norme prévoit 5 détails, numérotés ci-dessous de 1 à 5 :



NF EN 1993-1-5 Figure 6.2

Détail	Description	Longueur d'appui rigide
(1)	La force transite avec une diffusion à 45°.	$s_s = t_{w,s} + 2 r_s + 2 t_{f,s}$
(2)	<i>Exemple : réaction d'une autre poutre laminée ou PRS, s'appuyant au niveau de la semelle supérieure et disposée transversalement à la poutre étudiée.</i>	$s_s = t_{w,s} + 2\sqrt{2} a_s + 2 t_{f,s}$
(3)	La force transite avec une diffusion à 45°. <i>Exemple : plat, gousset d'un contreventement, chape...</i>	$s_s = t_p + 2\sqrt{2} a_p$
(4)	Selon la NF EN 1993-1-5 § 6.3 (2), lorsque plusieurs charges concentrées sont relativement proches, les deux vérifications suivantes doivent être effectuées : - pour chaque forces agissant seules : voir détails 1, 2, 3 ou 5 pour $s_s$ . - pour la somme des forces : $s_s$ pris entre points d'application des charges.	
(5)	La force transite par une surface inclinée.	$s_s = 0 \text{ mm}$

Avec :

$t_{w,s}$	Épaisseur de l'âme de la poutre secondaire
$t_{f,s}$	Épaisseur de la semelle inférieure de la poutre secondaire
$r_s$	Rayon de congé de la poutre secondaire laminée
$a_s$	Gorge de soudure de la poutre secondaire PRS
$t_p$	Épaisseur du plat
$a_p$	Gorge de soudure du plat

**Note :** Dans tous les cas, il y a lieu de ne pas prendre en compte dans les calculs une valeur de  $s_s$  supérieure à  $h_w$ .

## Calculs intermédiaires

### 3<sup>e</sup> étape : calcul des coefficients de diffusion

Les coefficients de diffusion  $m_1$  et  $m_2$ , sont relatifs au mode de ruine par plastification de l'âme. Ils interviennent dans le calcul de la longueur chargée efficace  $\ell_y$ .

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.8)}$$

$$m_2 = 0,02 \left( \frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{si } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.9)}$$

$$m_2 = 0 \quad \text{si } \bar{\lambda}_F \leq 0,5$$

Avec :

$f_{yf}$	Limite d'élasticité de l'acier de la semelle où s'applique l'effort
$f_{yw}$	Limite d'élasticité de l'acier de l'âme
$b_f$	Largeur de la semelle supérieure

Le calcul de  $m_2$  dépend de la valeur de l'élancement réduit de l'âme  $\bar{\lambda}_F$ , qui n'est pas encore connu à ce stade de l'étude puisqu'il dépend lui même de la longueur chargée efficace  $\ell_y$ . Un calcul itératif peut alors s'avérer nécessaire. Dans un premier temps, il faudra donc faire une hypothèse sur la valeur de l'élancement, par exemple en considérant qu'il est supérieur à 0,5 ; puis calculer  $m_2$ . Cette hypothèse devra être vérifiée lors du calcul de l'élancement réduit, lors de l'étape n°7. Si elle est invalidée, il sera nécessaire de reprendre les calculs à partir de cette étape, en considérant l'hypothèse alternative.

#### 4<sup>e</sup> étape : calcul du coefficient de voilement

Le coefficient de voilement  $k_F$ , relatif au mode de ruine par instabilité de l'âme, dépend du type d'application de la charge et de la présence ou non de raidisseurs longitudinaux.

Pour les âmes sans raidisseurs longitudinaux : NF EN 1993-1-5 Figure 6.1

Type	Coefficient de voilement
(a)	$k_F = 6 + 2 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2$
(b)	$k_F = 3,5 + 2 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2$
(c)	$k_F = 2 + 6 \left( \frac{s_s + c}{h_w} \right) \leq 6$

#### Notes :

- Dans le cas où la poutre ne comporte pas de raidisseurs transversaux, la distance  $a$  est prise comme étant infiniment grande.
- Il n'est pas possible de calculer le coefficient de voilement par d'autres moyens que les formules de la norme.

Pour les âmes avec raidisseurs longitudinaux :

Dans le cas particulier des âmes avec raidisseurs longitudinaux, des formules pour le calcul de  $k_F$  peuvent être trouvées au § 6.4 (2) de la NF EN 1993-1-5.

#### 5<sup>e</sup> étape : calcul de la longueur chargée efficace

La longueur charge efficace  $\ell_y$  dépend du type d'application de la charge, ainsi que des trois coefficients  $m_1$ ,  $m_2$ , et  $k_F$  calculés aux étapes n°3 et n°4.

Type (a) et (b) :

$$\ell_y = s_s + 2 t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \leq a \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.10)}$$

Type (c) :

$$\ell_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.13)}$$

$$\ell_{y,1} = s_s + 2 t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \leq a \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.10)}$$

$$\ell_{y,2} = \ell_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{\ell_e}{t_f}\right)^2 + m_2} \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.11)}$$

$$\ell_{y,3} = \ell_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.12)}$$

$$\ell_y = \min \{ \ell_{y,1} ; \ell_{y,2} ; \ell_{y,3} \}$$

Avec :

$E$                     Module d'Young de l'acier  
 $\ell_{y,1}; \ell_{y,2};$   
 $\ell_{y,3}$                 Valeurs intermédiaires de calcul (dénomination hors Eurocode)

Attention : pour le type (c), il convient de prendre en compte la formule de  $\ell_y$  corrigée, telle qu'elle a été mise à jour par l'amendement A1 de l'EN 1993-1-5, publié en juillet 2017.

#### 6<sup>e</sup> étape : calcul de la force critique de voilement local

La force critique  $F_{cr}$ , de voilement élastique de l'âme est déduite par l'équation :

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.5)}$$

#### 7<sup>e</sup> étape : calcul de l'élançement réduit

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{\ell_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.4)}$$

A ce niveau, il est obligatoire de vérifier l'hypothèse établie à l'étape n°3 pour le calcul de  $m_2$ . Si l'élançement réduit est inférieur à 0,5 alors  $m_2 = 0$ , et les étapes de calcul n°5 et n°7 sont à reprendre.

#### 8<sup>e</sup> étape : calcul de la longueur efficace pour la résistance aux forces transversales

La longueur efficace pour la résistance aux forces transversales  $L_{eff}$ , correspond à la longueur chargée efficace  $\ell_y$  réduite par le coefficient de voilement local  $\chi_F$ . Ce dernier prend en compte le risque d'instabilité de l'âme et est obtenu par l'expression suivante :

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1 \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.3)}$$

Et donc :

$$L_{eff} = \chi_F \ell_y \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.2)}$$

## Vérification de la résistance sous force transversale

### 9<sup>e</sup> étape : calcul de la résistance de l'âme aux forces transversales

Comme vu en introduction, la résistance de l'âme s'obtient par :

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}} \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.1)}$$

### 10<sup>e</sup> étape : Vérification de la résistance sous force transversale

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1 \quad \text{NF EN 1993-1-5 eq. (6.14)}$$

## Conclusion

Si le critère  $\eta_2$  n'est pas vérifié, alors l'âme de la poutre ne peut pas résister seule à la force transversale appliquée. Une solution usuelle est de souder des raidisseurs transversaux de part et d'autre de l'âme, entre les semelles, au droit de la charge transversale. En effet, ces raidisseurs permettent d'améliorer la résistance locale de l'âme de manière efficace. La surface additionnelle offerte par les raidisseurs améliore la diffusion des contraintes locales tandis que leurs inerties hors plan améliorent la tenue de l'âme au voilement local. La justification des raidisseurs n'est pas abordée ici. Le chapitre 9 de la NF EN 1993-1-5 fournit de plus amples informations à ce sujet.

Par ailleurs, en plus de la vérification de la résistance à la force transversale seule, il y a lieu de vérifier l'interaction avec le moment et l'effort normal transitant également dans la poutre : voir NF EN 1993-1-5 § 7.2. Cette interaction n'est pas détaillée ici.