

*Ce texte présente de manière synthétique le calcul de la résistance au flambement en compression simple d'un profil creux à section circulaire de classe 4, selon les parties 1-1 et 1-6 de l'Eurocode 3.*

*Un exemple d'application est donné en fin d'article*

Selon le Tableau 5.2 de la norme NF EN 1993-1-1 [1], la classe d'une section creuse circulaire est déterminée en fonction du rapport du diamètre extérieur ( $d_e$ ) à l'épaisseur ( $t$ ). La section est de classe 4 si :  $d_e/t > 90\varepsilon^2$  avec :  $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$  (où  $f_y$  est la limite d'élasticité en MPa). Dans ce cas, la norme NF EN 1993-1-1 renvoie à la norme NF EN 1993-1-6 [4] « Résistance et stabilité des structures en coque » afin de tenir compte du voilement de coque.

Par ailleurs, la résistance de calcul d'une barre simplement comprimée vis-à-vis du flambement est calculée selon les formules de la NF EN 1993-1-1 :

- $N_{b,Rd} = \chi_b A f_y / \gamma_{M1}$  pour les sections de classe 1, 2 et 3
- $N_{b,Rd} = \chi_b A_{eff} f_y / \gamma_{M1}$  pour les sections de classe 4

Pour les sections circulaires de classe 4, la notion d'aire efficace ( $A_{eff}$ ) n'est pas définie dans l'Eurocode 3. Une méthode pratique est proposée dans la référence [7] en respectant les principes de vérification de l'Eurocode 3. Cet article présente la méthodologie de manière synthétique à partir d'organigrammes. Il convient toutefois de noter que, depuis la publication de la référence [7], certaines expressions ont été modifiées par l'amendement NF EN 1993-1-6/A1 daté de juillet 2017 [6].

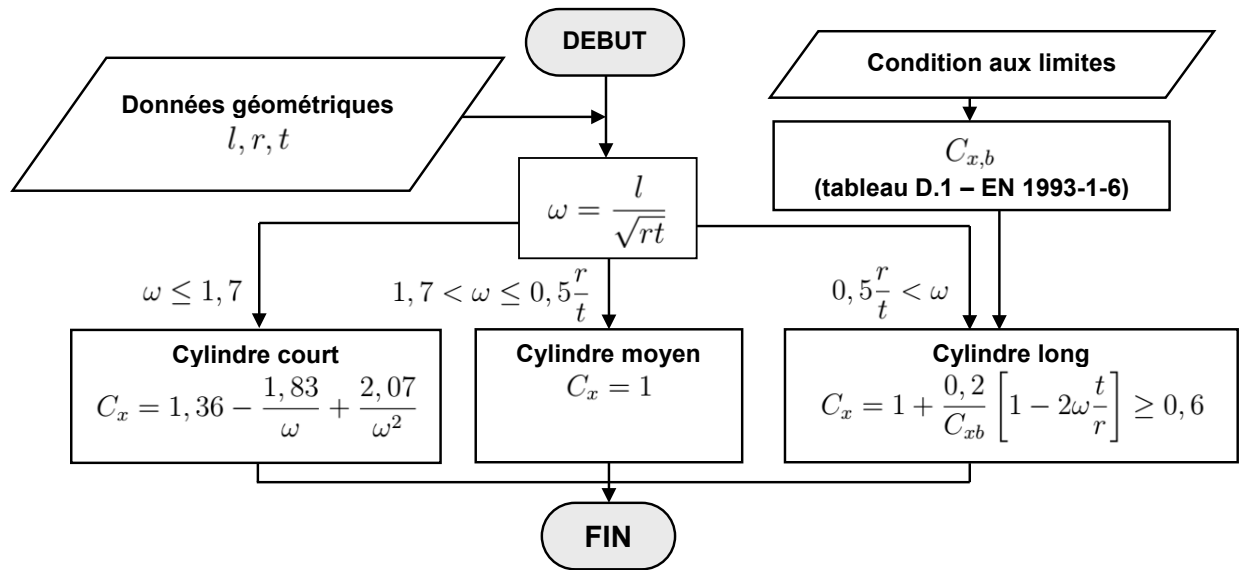
La procédure de calcul comprend les trois étapes suivantes, chacune correspondant à un organigramme donné dans la suite :

- Étape 1 : calcul du coefficient  $C_x$  (NF EN 1993-1-6);
- Étape 2 : calcul de la résistance caractéristique au voilement méridien (NF EN 1993-1-6);
- Étape 3 : calcul de la résistance au flambement de la barre comprimée (NF EN 1993-1-1).

## Principales modifications de l'amendement A1 de l'EN 1993-1-6 concernant les calculs présentés

Par rapport à la méthodologie décrite dans la référence [7], l'amendement [6] contient les modifications dans les formules de calcul des paramètres  $\alpha_x$ ,  $\beta_x$  et  $\eta_x$  (voir l'étape 2).

## Étape 1 – Calcul du coefficient $C_x$



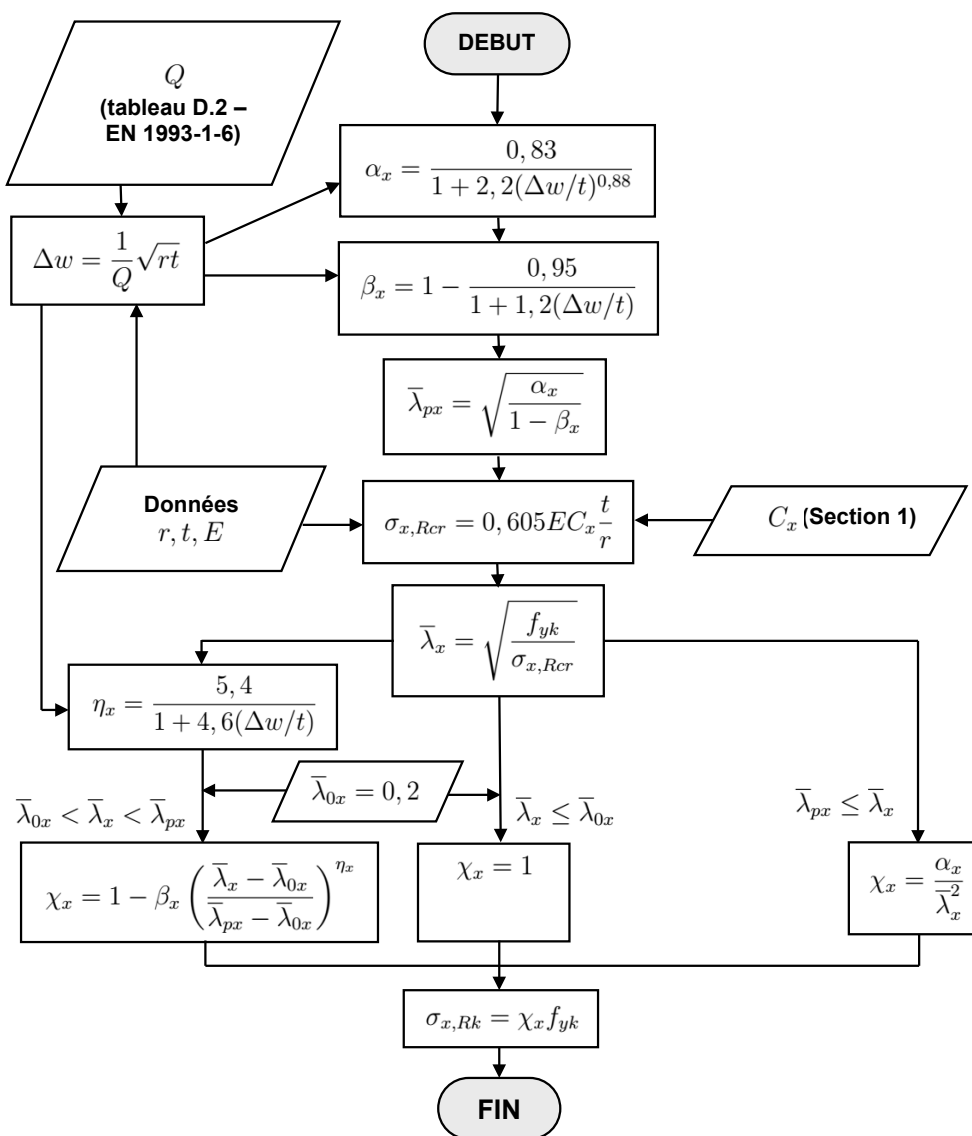
### Notations :

- $l$  longueur de la barre,
- $r$  rayon de la surface médiane du cylindre,
- $t$  épaisseur de la paroi,
- $\omega$  paramètre de longueur adimensionnel,
- $C_{x,b}$  paramètre dépendant des conditions aux limites pour les coques :

Cas	Extrémité de cylindre	Conditions aux limites	$C_{x,b}$
1	Extrémité 1	BC1	6
	Extrémité 2	BC1	
2	Extrémité 1	BC1	3
	Extrémité 2	BC2	
3	Extrémité 1	BC2	1
	Extrémité 2	BC2	

BC1 : déplacements normaux ( $w = 0$ ) et déplacements méridiens ( $u = 0$ )  
BC2 : déplacement normaux ( $w = 0$ )

## Étape 2 – Calcul de la résistance caractéristique au voilement méridien $\sigma_{x,Rk}$



### Notations :

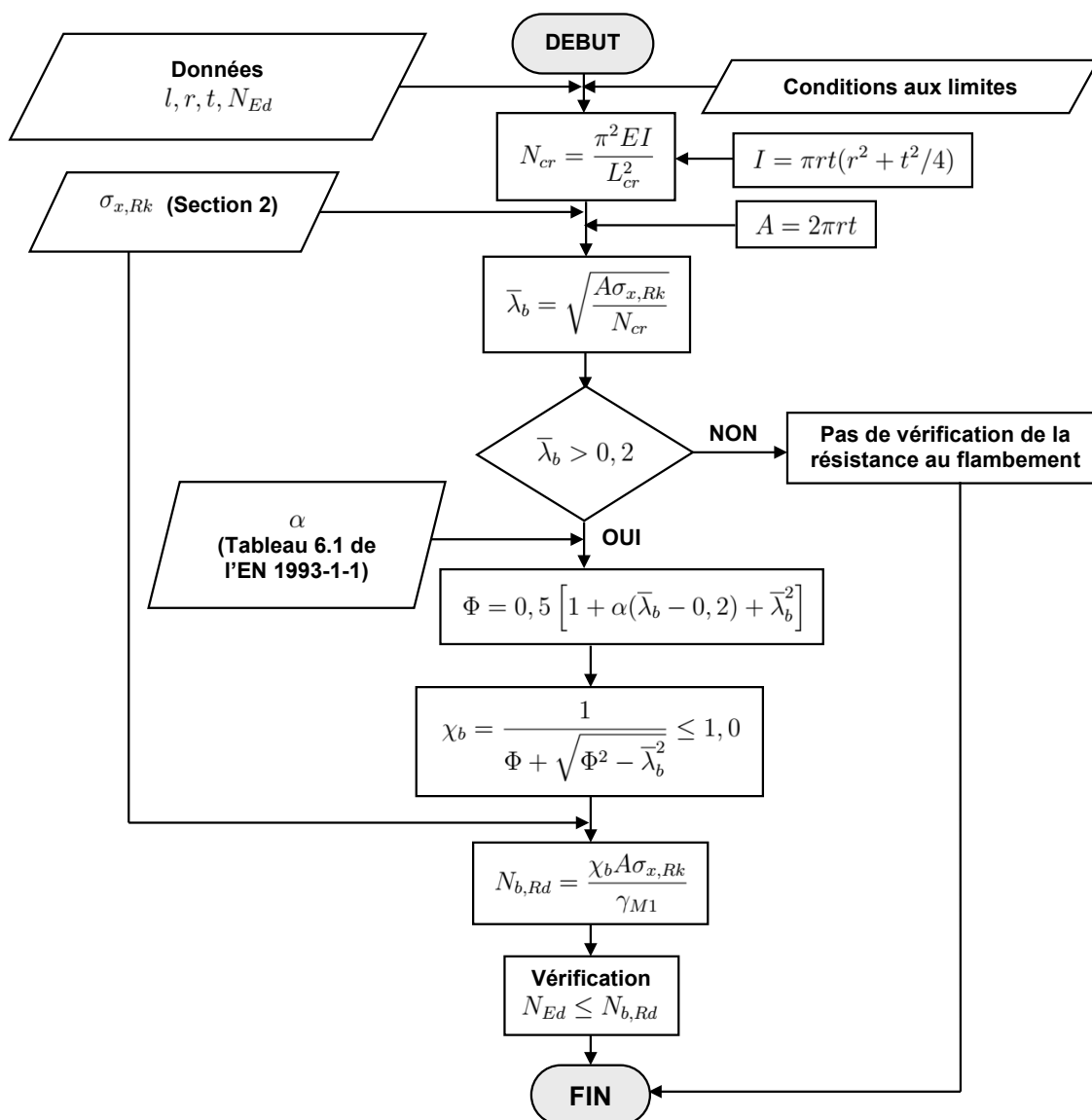
$Q$  paramètre de qualité de fabrication, donné dans le tableau suivant :

Classe de qualité de tolérance de fabrication	Description	$Q$
Classe A	Excellente	40
Classe B	Élevée	25
Classe C	Normale	16

$\alpha_x$  facteur de réduction de la résistance au voilement élastique méridien,

- $\beta_x$  facteur de domaine plastique,
- $\eta_x$  exposant d'interaction,
- $\Delta w$  amplitude caractéristique d'imperfection,
- $\bar{\lambda}_x$  élancement réduit de coque,
- $\bar{\lambda}_{px}$  élancement réduit à la limite plastique,
- $\sigma_{x,Rcr}$  contrainte critique au voilement méridien,
- $\chi_x$  coefficient de réduction de la résistance au voilement élasto-plastique,
- $E$  module d'Young :  $E = 210000$  MPa.

## Étape 3 – Calcul de la résistance au flambement de la barre comprimée



## Notations :

- $N_{Ed}$  valeur de calcul de l'effort de compression,  
 $N_{cr}$  effort normal critique de flambement élastique,  
 $L_{cr}$  longueur de flambement dépendant des conditions aux limites de barre,  
 $\bar{\lambda}_b$  élancement réduit pour le flambement de la barre,  
 $\chi_b$  coefficient de réduction de la résistance au flambement,  
 $\alpha$  facteur d'imperfection dépendant du type de profil et de la nuance d'acier :

Sections creuses circulaires	Courbes de flambement	
	S235, S275, S355, S420	S460
Finies à chaud	a $\alpha = 0,21$	a <sub>0</sub> $\alpha = 0,13$
Formées à froid	c $\alpha = 0,49$	c $\alpha = 0,49$

## Exemple d'application

### Données

Barre bi-articulée de longueur  $l = 8$  m, soumise à un effort axial de compression de  $N_{Ed} = 900$  kN.

Caractéristiques de la section creuse circulaire (finie à chaud) :

- Diamètre extérieur :  $d_e = 323,9$  mm
- Épaisseur :  $t = 5$  mm
- Rayon de la surface médiane :  $r = (d_e - t)/2 = 159,45$  mm
- Aire de la section :  $A = 2\pi r t = 50,09$  cm<sup>2</sup>
- Moment d'inertie de flexion :  $I = 6369$  cm<sup>4</sup>
- Nuance d'acier : S355
- Classe de qualité de tolérance de fabrication : B

La section est de classe 4 car :  $d_e/t = 323,9/5 = 64,78 > 90\varepsilon^2 = 59,58$  avec  $\varepsilon^2 = 235/355 = 0,66$ .

### Étape 1 – Calcul du coefficient $C_x$

Paramètre de longueur adimensionnel :

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}} = \frac{8 \cdot 10^3}{\sqrt{159,45 \cdot 5}} = 283,33 > 0,5 \frac{r}{t} = 0,5 \frac{159,45}{5} = 15,945$$

⇒ Le tube est de type « cylindre long ».

Conditions aux limites de la barre: BC2 pour les deux extrémités (barre articulée).  
 On a donc :  $C_{xb} = 1,0$ .

$$C_x = 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[ 1 - 2\omega \frac{t}{r} \right] = 1 + \frac{0,2}{1} \left[ 1 - 2 \cdot 283,33 \cdot \frac{5}{159,45} \right] = -2,35 < 0,6$$

$$\Rightarrow C_x = 0,6$$

## Étape 2 – Calcul de la résistance caractéristique au voilement méridien

Contrainte critique de voilement élastique méridienne :

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605EC_x \frac{t}{r} = 0,605 \cdot 210000 \cdot 0,6 \cdot \frac{5}{159,45} = 2390,4 \text{ MPa}$$

Elancement réduit :

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{355}{2390,4}} = 0,385$$

Amplitude caractéristique d'imperfection :

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{rt} = \frac{1}{25} \sqrt{159,45 \cdot 5} = 1,129 \text{ mm}$$

où :  $Q = 25$  qui correspond à la classe de qualité de fabrication B

Facteur de réduction de la résistance au voilement élastique méridien :

$$\alpha_x = \frac{0,83}{1 + 2,2(\Delta w_k/t)^{0,88}} = \frac{0,83}{1 + 2,2(1,129/5)^{0,88}} = 0,521$$

Facteur du domaine plastique :

$$\beta_x = 1 - \frac{0,95}{1 + 1,2(\Delta w_k/t)} = 1 - \frac{0,95}{1 + 1,2(1,129/5)} = 0,253$$

Elancement réduit limite plastique :

$$\bar{\lambda}_{px} = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1 - \beta_x}} = \sqrt{\frac{0,521}{1 - 0,253}} = 0,835$$

$$\Rightarrow \bar{\lambda}_{x0} = 0,2 < \bar{\lambda}_x = 0,385 < \bar{\lambda}_{px} = 0,835$$

Exposant d'interaction :

$$\eta_x = \frac{5,4}{1 + 4,6(\Delta w_k/t)} = \frac{5,4}{1 + 4,6(1,129/5)} = 2,649$$

Coefficient de réduction de la résistance au voilement élasto-plastique :

$$\chi_x = 1 - \beta_x \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_{x,0}}{\bar{\lambda}_{px} - \bar{\lambda}_{x,0}} \right)^{\eta_x} = 1 - 0,253 \left( \frac{0,385 - 0,2}{0,835 - 0,2} \right)^{2,649} = 0,99$$

Résistance caractéristique au voilement méridien :

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk} = 0,99 \cdot 355 = 351,4 \text{ MPa}$$

## Étape 3 – Calcul de la résistance au flambement de la barre

Effort normal critique de flambement élastique :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot (210000 \cdot 10^{-3}) \cdot (6369 \cdot 10^4)}{(8 \cdot 10^3)^2} = 2062,6 \text{ kN}$$

Elongement réduit pour le flambement de la barre :

$$\bar{\lambda}_b = \sqrt{\frac{A\sigma_{x,Rk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{(50,09 \cdot 10^2) \cdot (351,4 \cdot 10^{-3})}{2062,6}} = 0,924$$

Coefficient de réduction de la résistance au flambement :

$$\Phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda}_b - 0,2) + \bar{\lambda}_b^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,21(0,924 - 0,2) + 0,924^2 \right] = 1,0$$

$$\chi_b = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_b^2}} = \frac{1}{1,0 + \sqrt{1,0^2 - 0,924^2}} = 0,723 < 1,0$$

où :  $\alpha = 0,21$  qui correspond à la courbe de flambement a pour des sections finies à chaud et en acier de nuance S355

Résistance au flambement de la barre :

$$N_{b,Rd} = \chi_b A \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} = 0,723 (50,09 \cdot 10^2) \cdot (351,4 \cdot 10^{-3}) / 1,1 = 1157 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow N_{Ed} = 900 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 1157 \text{ kN}$$

La résistance au flambement de la barre est donc vérifiée.

## Références

- [1] **NF EN 1993-1-1** – Eurocode 3 – « Calcul des structures en acier » – Partie 1-1 : « Règles générales et règles pour les bâtiments ». AFNOR. Octobre 2005.
- [2] **NF EN 1993-1-1/NA** – Annexe Nationale à la NF EN 1993-1-1 : 2005. AFNOR. Août 2013.
- [3] **NF EN 1993-1-1/A1** – Amendement à la NF EN 1993-1-1 : 2005. AFNOR. Juillet 2014.
- [4] **NF EN 1993-1-6** – Eurocode 3 – « Résistance et stabilité des structures en coque ». AFNOR. Juillet 2007.
- [5] **NF EN 1993-1-6/NA** – Annexe Nationale à la NF EN 1993-1-6 : 2007. AFNOR. Mai 2010.
- [6] **NF EN 1993-1-6/A1** – Amendement à la NF EN 1993-1-6 : 2007. AFNOR. Juillet 2017.
- [7] **T.M. NGUYEN** – « Résistance au flambement d'un profil creux circulaire de classe 4 selon l'Eurocode 3 ». Revue Construction Métallique. N°4-2011.