SCIA
BY ALLPLAN



\ SCIA ENGINEER
FORMATION AVANCÉE
Profilés formés à froid

Toutes les informations contenues dans ce document sont sujettes à modification sans préavis. Aucune partie de ce manuel ne peut être reproduite, stockée dans une base de données ou un système d'extraction ou publiée, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit, électroniquement, mécaniquement, par impression, impression photo, microfilm ou tout autre moyen sans l'autorisation écrite préalable de l'éditeur. SCIA n'est pas responsable des dommages directs ou indirects dus à des imperfections de la documentation et / ou du logiciel.

© Copyright 2026 SCIA nv. Tous les droits sont réservés

Sommaire

Sommaire 3
Chapitre 1: INTRODUCTION 5
Chapitre 2: MATÉRIAUX ET COMBINAISONS 6
2.1. Nuances d'acier 6
2.2. Épaisseur du noyau d'acier 12
2.3. Combinaisons 14
Chapitre 3: FLAMBEMENT LOCAL ET DISTORSIONNEL 16
3.1. Forme initiale 16
3.2. Forme efficace 18
3.3. Procédure générale du calcul de la forme efficace 35
Chapitre 4: SECTIONS GÉNÉRALES 38
4.1. Option « Paroi mince » 38
4.2. Import depuis un fichier DWG / DXF 40
Chapitre 5: CONTRÔLES ELS 43
Chapitre 6: CONTRÔLES ELU 45
6.1. Contrôles en section 49
A. Traction 49
B. Compression 49
C. Moment fléchissant 49
D. Effort tranchant 50
E. Moment torsionnel 50
F. Efforts transversaux locaux 51
G. Traction et flexion combinées 57
H. Compression et flexion combinées 57
I. Effort tranchant, effort normal et moment fléchissant combinés 57
J. Moment fléchissant et charge locale ou réaction d'appui combinés 59
6.2. Contrôles en stabilité 60
A. Remarques générales 60
B. Ratio de flambement 60
C. Flambement torsionnel (-flexionnel) 66
D. Déversement 67
E. Flexion et compression 71
F. Flexion et traction 73
6.3. Données additionnelles 74
A. Données d'élément acier 74

B. Longueurs système et groupes de flambement 75
C. Maintiens au déversement 76
Chapitre 7: CALCUL DE PANNES 79
7.1. Aperçu 81
7.2. Résistance de calcul 86
A. Résistance de section 86
B. Résistance de l'aile libre 90
Chapitre 8: ANALYSE AU SECOND ORDRE 95
RÉFÉRENCES 97

Chapitre 1: INTRODUCTION

Bienvenue dans le manuel de formation avancée sur les profilés formés à froid.

Ce manuel détaille le calcul et les contrôles d'une structure métallique construite avec des profilés formés à froid.

Chapitre 2: MATÉRIAUX ET COMBINAISONS

2.1. Nuances d'acier

Les valeurs caractéristiques des propriétés des matériaux sont basées sur l'EN 1993-1-3, tableau 3.1.

Tableau 3.1.a — Valeurs nominales de la limite d'élasticité de base f_{yb} et de la résistance ultime à la traction f_u

Type d'acier	Norme	Nuance	f_{yb} N/mm^2	f_u N/mm^2
Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés. Partie 2 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés	EN 10025 : Partie 2	S 235	235	360
		S 275	275	430
		S 355	355	510
Produits laminés à chaud en aciers de construction. Partie 3 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins à l'état normalisé/ laminage normalisant	EN 10025 : Partie 3	S 275 N	275	370
		S 355 N	355	470
		S 420 N	420	520
		S 460 N	460	550
		S 275 NL	275	370
		S 355 NL	355	470
		S 420 NL	420	520
		S 460 NL	460	550
Produits laminés à chaud en aciers de construction. Partie 4 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins obtenus par laminage thermomécanique	EN 10025 : Partie 4	S 275 M	275	360
		S 355 M	355	450
		S 420 M	420	500
		S 460 M	460	530
		S 275 ML	275	360
		S 355 ML	355	450
		S 420 ML	420	500
		S 460 ML	460	530

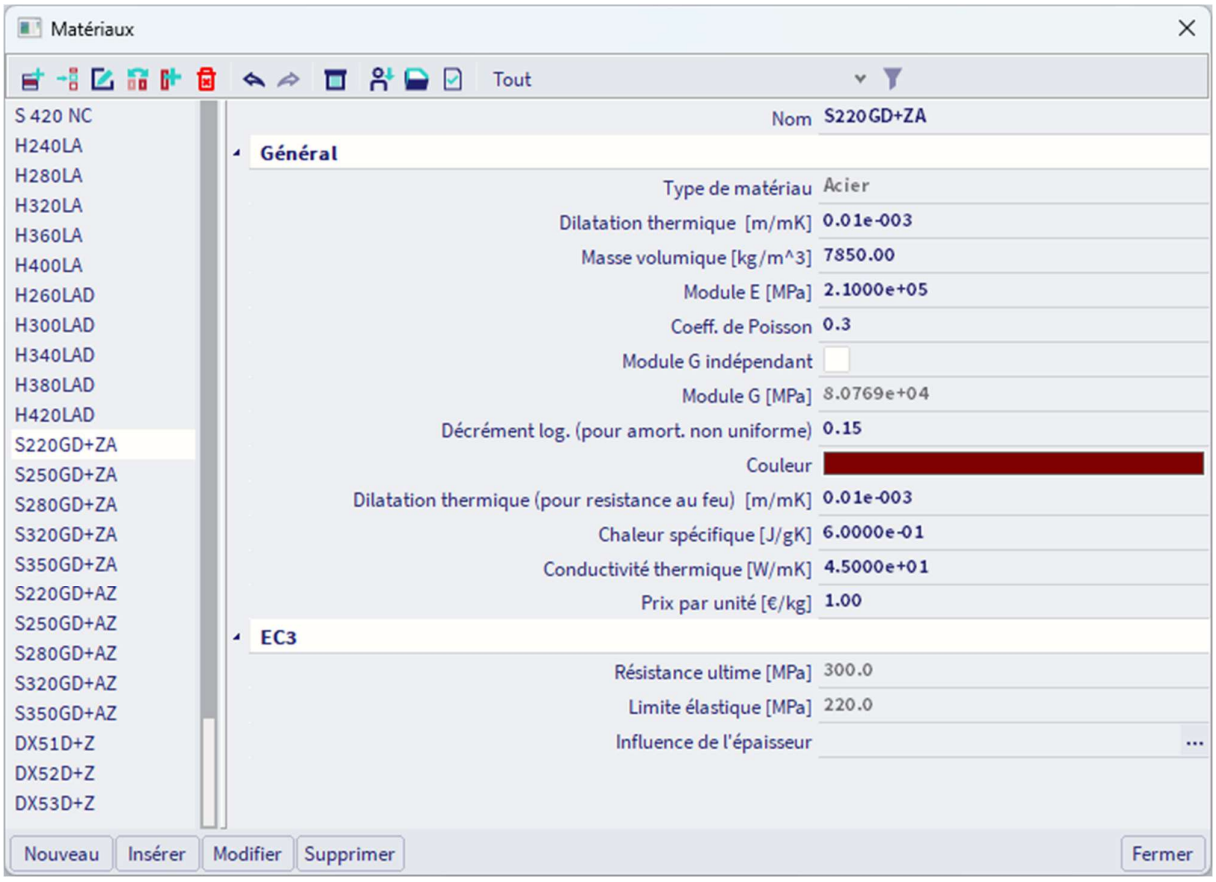
Tableau 3.1.b — Valeurs nominales de la limite d'élasticité de base f_{yb} et de la résistance ultime à la traction f_u

Type d'acier	Norme	Nuance	f_{yb} N/mm^2	f_u N/mm^2
Tôles en acier de construction laminées à froid	ISO 4997	CR 220	220	300
		CR 250	250	330
		CR 320	320	400
Tôles en aciers de construction galvanisées à chaud en continu	EN 10326	S220GD+Z	220	300
		S250GD+Z	250	330
		S280GD+Z	280	360
		S320GD+Z	320	390
		S350GD+Z	350	420
Produits plats laminés à chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid. Partie 2 : Conditions de livraison des aciers obtenus par laminage thermomécanique	EN 10149 : Partie 2	S 315 MC	315	390
		S 355 MC	355	430
		S 420 MC	420	480
		S 460 MC	460	520
		S 500 MC	500	550
		S 550 MC	550	600
		S 600 MC	600	650
		S 650 MC	650	700
		S 700 MC	700	750
	EN 10149 : Partie 3	S 260 NC	260	370
		S 315 NC	315	430
		S 355 NC	355	470
		S 420 NC	420	530
Produits plats laminés à froid en aciers micro-alliés à haute limite d'élasticité pour formage à froid	EN 10268	H240LA	240	340
		H280LA	280	370
		H320LA	320	400
		H360LA	360	430
		H400LA	400	460
Bandes et tôles en aciers à haute limite d'élasticité revêtues en continu par immersion à chaud pour formage à froid	EN 10292	H260LAD	240 [2)]	340 [2)]
		H300LAD	280 [2)]	370 [2)]
		H340LAD	320 [2)]	400 [2)]
		H380LAD	360 [2)]	430 [2)]
		H420LAD	400 [2)]	460 [2)]
Bandes et tôles en acier revêtues à chaud en continu d'alliage zinc-aluminium (ZA)	EN 10326	S220GD+ZA	220	300
		S250GD+ZA	250	330
		S280GD+ZA	280	360
		S320GD+ZA	320	390
		S350GD+ZA	350	420
Bandes et tôles en acier revêtues d'alliage aluminium-zinc (AZ) à chaud en continu	EN 10326	S220GD+AZ	220	300
		S250GD+AZ	250	330
		S280GD+AZ	280	360
		S320GD+AZ	320	390
		S350GD+AZ	350	420
Bandes et tôles en aciers doux galvanisées à chaud et en continu pour formage à froid	EN 10327	DX51D+Z	140 [1)]	270 [1)]
		DX52D+Z	140 [1)]	270 [1)]
		DX53D+Z	140 [1)]	270 [1)]

1) Les valeurs minimales de la limite d'élasticité et de la résistance ultime à la traction ne sont pas données dans la norme. Pour toutes les nuances d'acier, une valeur minimale de 140 N/mm^2 pour la limite d'élasticité et de 270 N/mm^2 pour la résistance ultime à la traction peuvent être supposées.

2) Les valeurs de la limite d'élasticité données par les désignations des différents matériaux correspondent à une traction transversale. Les valeurs relatives à la traction longitudinale sont données dans le Tableau.

Dans SCIA Engineer, les matériaux suivants sont fournis par défaut :



Lorsque l'EC3 est sélectionné et que des sections formées à froid sont sélectionnées, la limite élastique moyenne peut être utilisée (en activant l'option dans les propriétés de la section).

La limite élastique moyenne est calculée comme suit (formule 3.1 de l'EN 1993-1-3) :

$$f_{ya} = f_{yb} + \left(\frac{knt^2}{A_g}\right)(f_u - f_{yb}) \leq \left(\frac{f_u + f_{yb}}{2}\right)$$

Avec :

- f_{yb} la limite élastique = f_y
- f_u la résistance ultime
- t l'épaisseur du matériau
- A_g la section brute
- k est un coefficient qui dépend du type de fabrication :
  - k = 7 pour les formés à froid
  - k = 5 pour les autres méthodes de fabrication
- n le nombre de crochets à 90° dans la section

La limite élastique moyenne ne peut pas être utilisée si A_{eff} n'est pas égal à la section brute A_g (donc pas pour les profilés de classe 4).

Exemple : 01.AverageYieldStrength.esa

Calcul manuel :

- CS1 : HE1000x393 – S235

  A = 50020mm²
  t_f = 43,9mm > 40mm => f_y = 215N/mm²
  Contrôle EC3 (éq. 6.10 de l'EN1993-1-1) :

$$N_{c,Rd} = \frac{A.f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{Rd} = \frac{50020 * 215}{1,00} = 10754,3kN$$

$$CU = \frac{500}{10754,3} = 0,05$$

- CS2 : SADEFU260x8,00

  A = 3330mm²
  n = 2

$$f_{ya} = 235 + \left(\frac{7 * 2 * 8^2}{3300} * (360 - 235)\right) = 235 + 33,6 = 268,6N/mm^2$$

$$f_{ya} = \min\left[268,77; \frac{360 + 235}{2}\right] = \min(268,77; 297,5) = 268,77N/mm^2$$

  Contrôle EC3 :

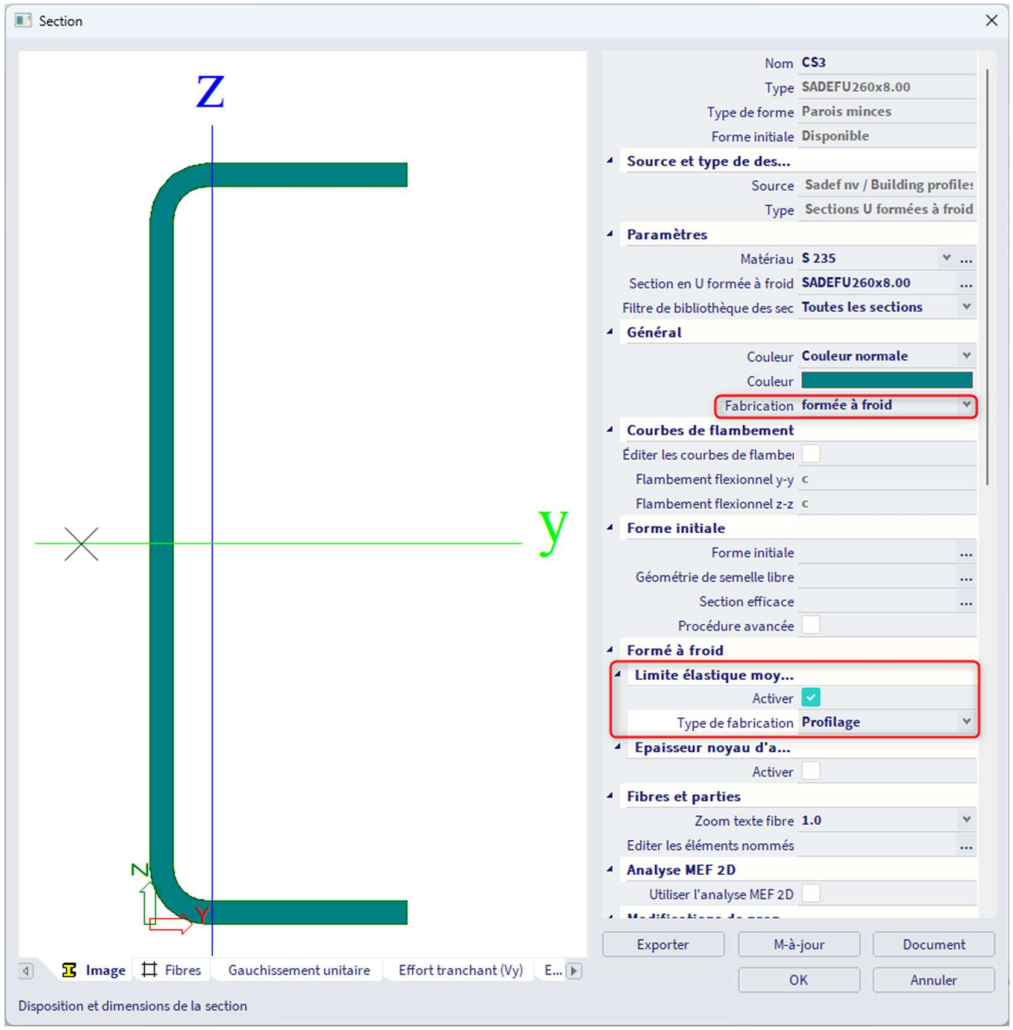
$$N_{c,Rd} = A_g * \left[f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) * 4 * \left(1 - \frac{\overline{\lambda_e}}{\overline{\lambda_{e0}}}\right)\right] * \frac{1}{\gamma_{M0}}$$

(A_{eff} = A_g => éq. 6.3 de l'EN1993-1-3)

$$N_{Rd} = 3330 * \left[235 + (268,6 - 235) * 4 * \left(1 - \frac{0,55}{0,67}\right)\right] * \frac{1}{1} = 866,34kN$$

$$CU = \frac{500}{866,34} = 0,58$$

Dans SCIA Engineer :



Matériau			
Limite élastique	f_{yb}	235.0	MPa
Limite élastique moyenne	f_{ya}	268.6	MPa
Coefficient de type de formation	k	7	
Nbre de courbures à 90°	n	2	
Limite de rupture	f_u	360.0	MPa

Contrôle compression

Selon EN 1993-1-3 article 6.1.3 et formule (6.3)

Aire de la section brute	A_g	3.3170e+03	mm^2
Elancement relatif	λ_e	0.55	
Élancement	λ_{e0}	0.67	
Résistance à la compression	$N_{c,Rd}$	863.05	kN
Contrôle unité		0.58	-

NB :

La limite élastique moyenne est calculée en utilisant la section brute A_g de la forme initiale.

Dans SCIA Engineer, la limite élastique moyenne est appliquée dans les calculs de résistance suivants :

- Traction axiale
- Compression axiale
- Moment fléchissant
- Moment torsionnel
- Flambement flexionnel
- Flambement torsionnel (-flexionnel)
- Calcul de panne – résistance en section

2.2. Épaisseur du noyau d'acier

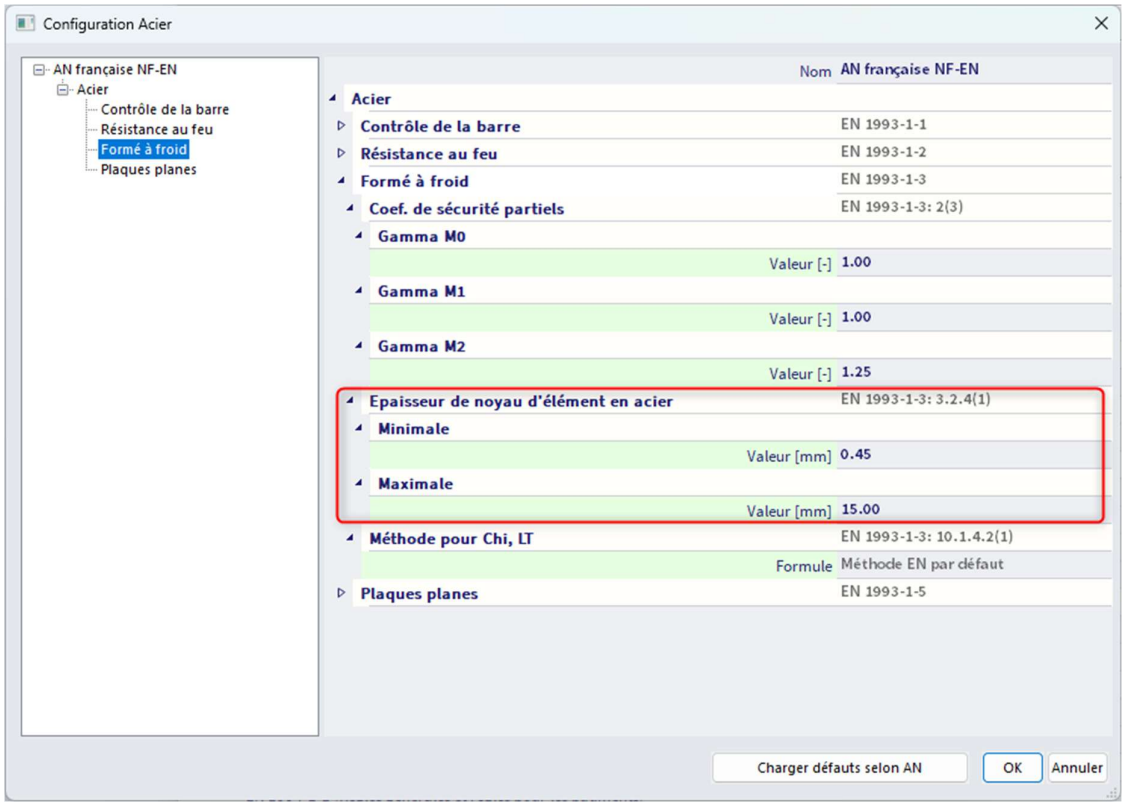
- ***Tolérances d'épaisseur***

Les dispositions pour le calcul données dans la partie 1-3 de l'EN 1993 peuvent être utilisées pour l'acier dans une plage donnée d'épaisseur de noyau t_{cor}.

La valeur par défaut dans l'EN 1993, art. 3.2.4, est :

$$0{,}45\text{mm} \leq t_{cor} \leq 15\text{mm}$$

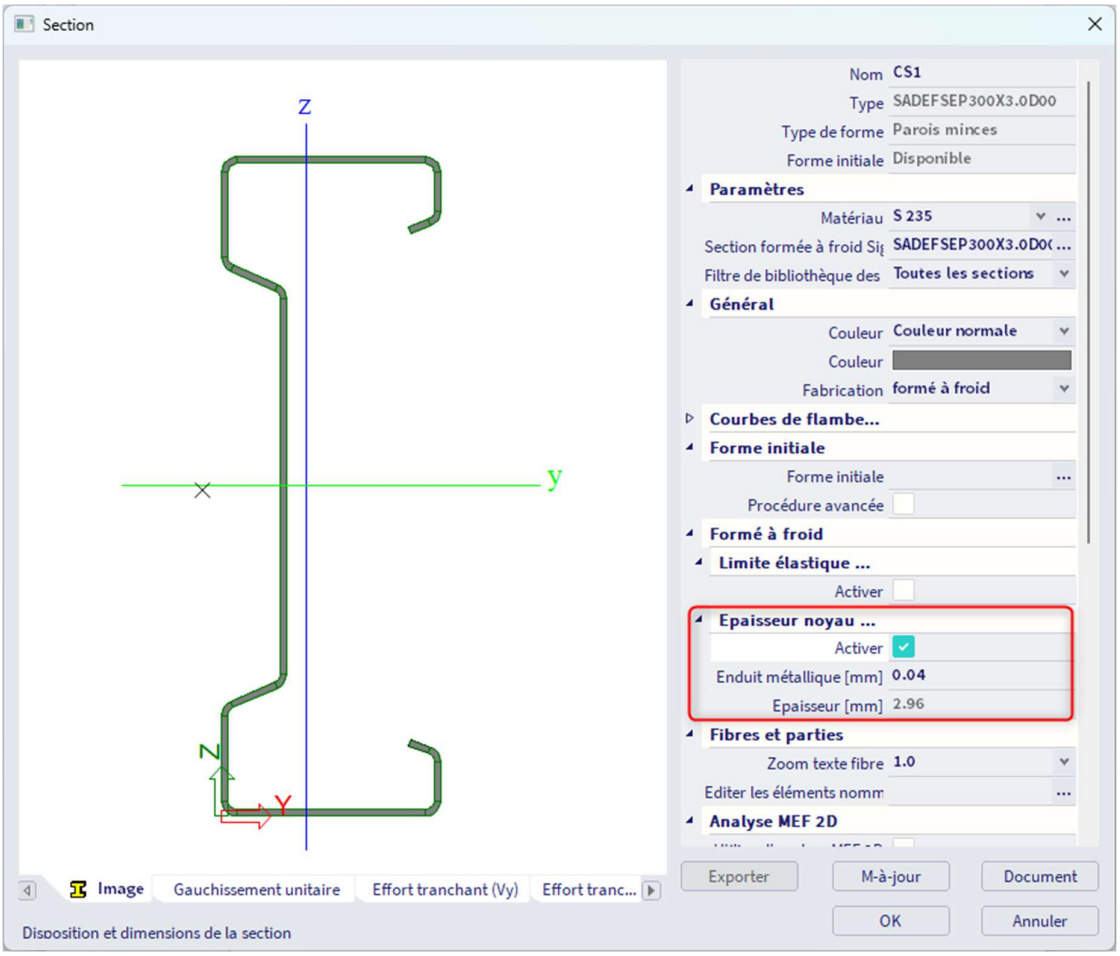
Mais cela peut être adapté dans l'annexe nationale :



- ***Épaisseur noyau***

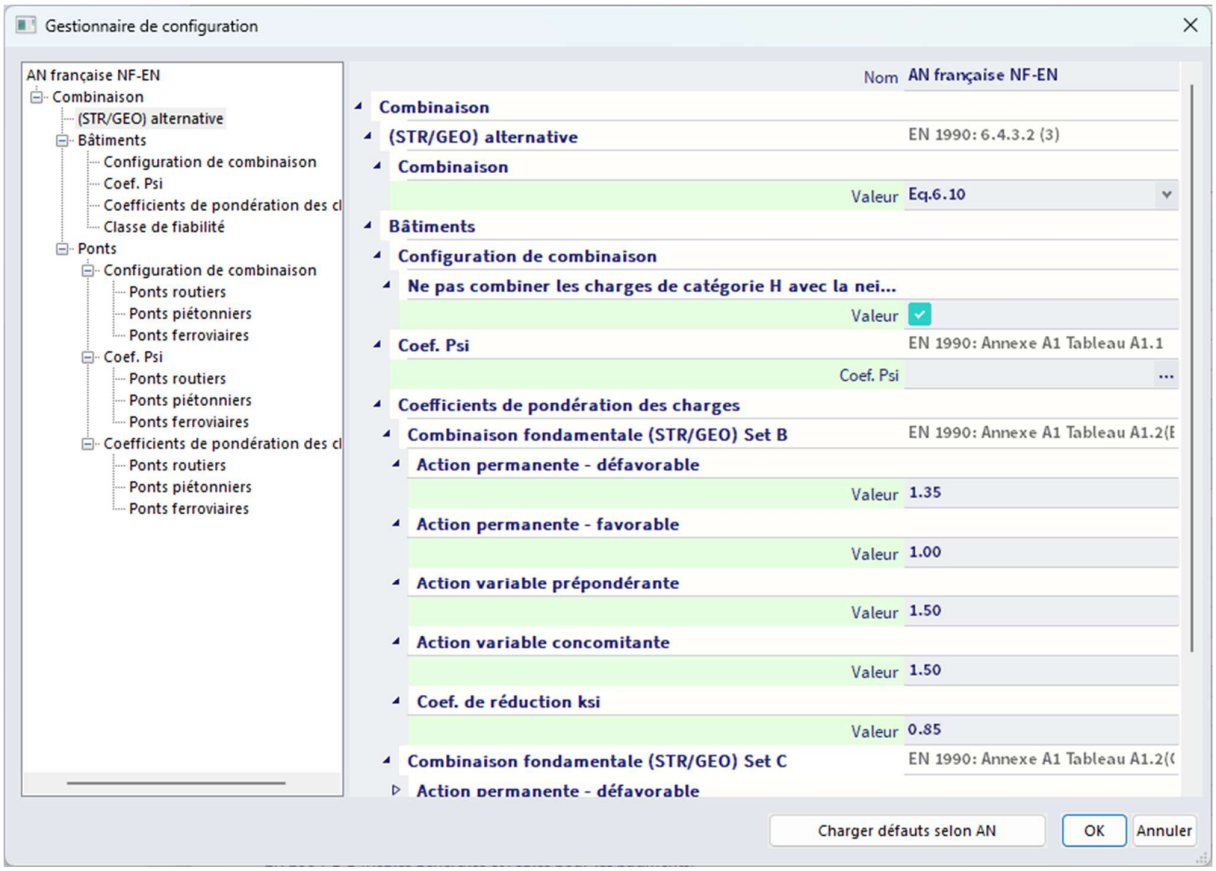
Dans SCIA Engineer, l'utilisateur peut choisir de prendre en compte (ou non) l'épaisseur du noyau. Cela peut être activé ou désactivé dans les propriétés de la section.

L'épaisseur par défaut est prise égale à 0,04mm mais peut être adaptée pour chaque profilé.



2.3. Combinaisons

Dans SCIA Engineer, les combinaisons ELU comme ELS peuvent être définies selon les règles de la norme pour l'EC-EN 1990. Dans la configuration de l'annexe nationale ci-dessous, les coefficients partiels de sécurité et les coefficients psi peuvent être définis.



D'après l'EC-EN 1990 :2002, les combinaisons ELU peuvent s'écrire de deux manières :

- En utilisant l'équation 6.10

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \; '+' \; \gamma_P P \; '+' \; \gamma_{Q,1} . Q_{k,1} \; '+' \; \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} . \psi_{0,i} . Q_{k,i}$$

- En utilisant les équations 6.10a et 6.10b

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \; '+' \; \gamma_P P \; '+' \; \gamma_{Q,1} . \psi_{0,i} . Q_{k,1} \; '+' \; \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} . \psi_{0,i} . Q_{k,i}$$

$$\sum_{j\geq 1} \xi_j . \gamma_{G,j} G_{k,j} \; '+' \; \gamma_P P \; '+' \; \gamma_{Q,1} . Q_{k,1} \; '+' \; \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} . \psi_{0,i} . Q_{k,i}$$

Les deux méthodes sont implémentées dans SCIA Engineer. La méthode appliquée est spécifiée dans l'annexe nationale.

Exemple :

Considérons une structure simple soumise à une charge permanente défavorable, une charge variable de catégorie A et une charge de vent.

Cet exemple est calculé en utilisant le Set B.

Actions permanentes défavorables : $\delta_G = 1{,}35$
Actions variables de base : $\delta_{Q,1} = 1{,}50$
Actions variables d'accompagnement : $\delta_{Q,i} = 1{,}50$
Charges de vent : $\psi_0 = 0{,}6$
Charges d'exploitation de catégorie A : $\psi_0 = 0{,}7$
Coefficient de réduction pour les actions permanentes défavorables : $\xi = 0{,}85$

En utilisant l'équation 6.10 :

- ⇨ Combinaison 1 : 1,35*Permanent + 1,50*Exploitation + 0,90*Vent
- ⇨ Combinaison 2 : 1,35*Permanent + 1,05*Exploitation + 1,50*Vent

En utilisant les équations 6.10a et 6.10b :

- ⇨ Combinaison 1 : 1,35*Permanent + 1,05*Exploitation + 0,90*Vent
- ⇨ Combinaison 2 : 1,15*Permanent + 1,50*Exploitation + 0,90*Vent
- ⇨ Combinaison 3 : 1,15*Permanent + 1,05*Exploitation + 1,50*Vent

---

Chapitre 3: FLAMBEMENT LOCAL ET DISTORSIONNEL

3.1. Forme initiale

Pour une section définie comme « formée à froid », la forme initiale doit être définie. Cette forme initiale est supportée pour les types de sections suivants :

- Bibliothèque de profilés standards
- Sections générales en parois minces
- Sections générales avec représentation à paroi mince
- Sections géométriques à paroi mince
- Toutes les autres sections qui supportent la ligne centrale et sans arrondis
- Sections paires formées à froid

Les types de parties sont utilisées pour déterminer la classification et les coefficients de réduction.

Les parties de section mince peuvent avoir les types suivants :

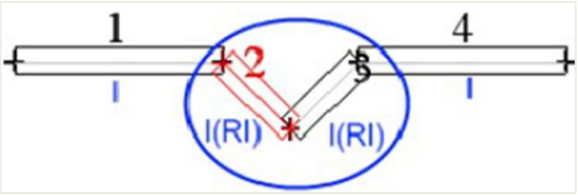
F	Partie fixe – Pas besoin de réduction
I	Partie de section interne
SO	Bord symétrique
UO	Bord non-symétrique

Une partie de section peut aussi être considérée comme un renfort :

Aucun	Non pris en compte comme renfort
RI	Renfort interne (raidisseur intermédiaire)
RUO	Renfort de bord non symétrique (raidisseur de bord)
DEF	Double pli au bord (raidisseur de bord)

Les types de renfort RUO et DEF peuvent être définis uniquement aux éléments de type SO ou UO.
Les types RI peuvent être définis uniquement aux éléments de type I ou UO ou SO.

Dans le cas où une partie est spécifiée comme renfort, un identifiant (ID) de renfort peut être saisi.
Pour les sections générales, les éléments voisins de type RI sont considérés comme un seul raidisseur pour le calcul de la section et l'inertie du raidisseur :

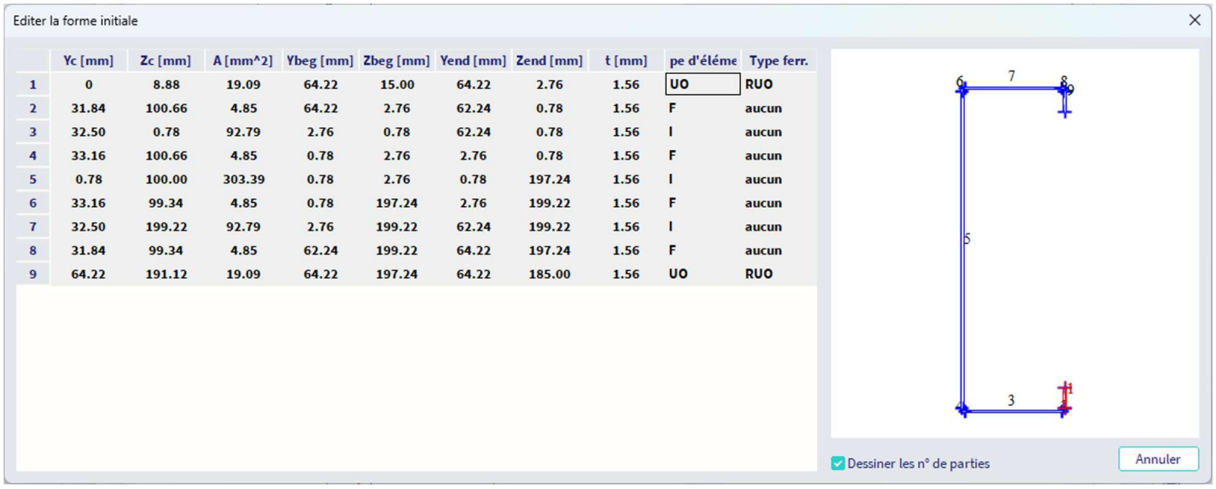


NB : Pour toutes les sections formées à froid, la forme initiale est générée automatiquement. Pour les sections générales créées par l'utilisateur uniquement, l'utilisateur doit insérer manuellement les types de parties de section corrects.

Exemple : 02.WS_CFS.esa

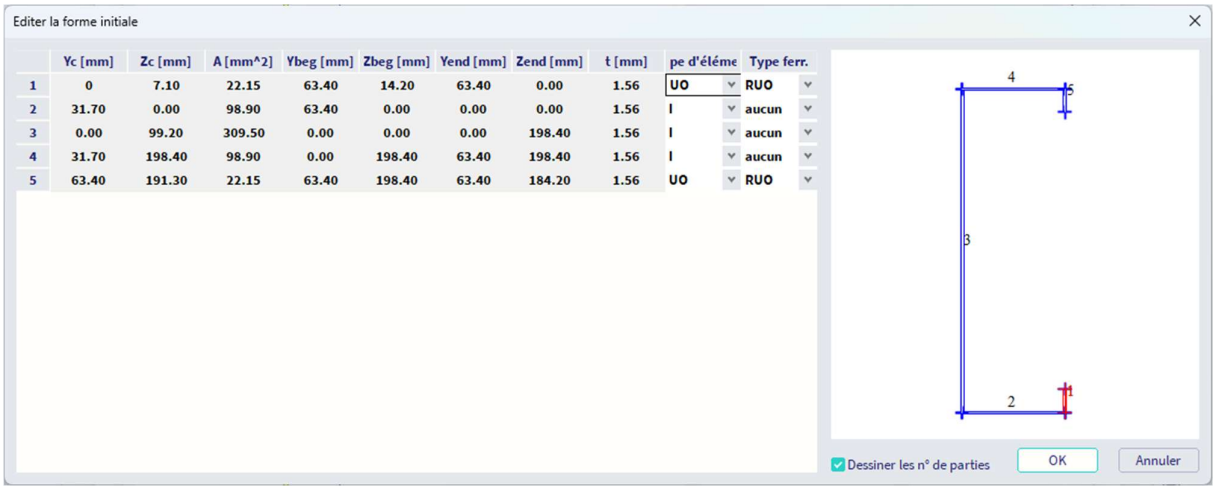
Dans l'éditeur de section, cliquer sur « Forme initiale ».

Forme initiale – Section CS1 (section c formée à froid de la bibliothèque)



	Yc [mm]	Zc [mm]	A [mm^2]	Ybeg [mm]	Zbeg [mm]	Yend [mm]	Zend [mm]	t [mm]	pe d'éléme	Type ferr.
1	0	8.88	19.09	64.22	15.00	64.22	2.76	1.56	UO	RUO
2	31.84	100.66	4.85	64.22	2.76	62.24	0.78	1.56	F	aucun
3	32.50	0.78	92.79	2.76	0.78	62.24	0.78	1.56	I	aucun
4	33.16	100.66	4.85	0.78	2.76	2.76	0.78	1.56	F	aucun
5	0.78	100.00	303.39	0.78	2.76	0.78	197.24	1.56	I	aucun
6	33.16	99.34	4.85	0.78	197.24	2.76	199.22	1.56	F	aucun
7	32.50	199.22	92.79	2.76	199.22	62.24	199.22	1.56	I	aucun
8	31.84	99.34	4.85	62.24	199.22	64.22	197.24	1.56	F	aucun
9	64.22	191.12	19.09	64.22	197.24	64.22	185.00	1.56	UO	RUO

Forme initiale – Section CS2 (section générale)



	Yc [mm]	Zc [mm]	A [mm^2]	Ybeg [mm]	Zbeg [mm]	Yend [mm]	Zend [mm]	t [mm]	pe d'éléme	Type ferr.
1	0	7.10	22.15	63.40	14.20	63.40	0.00	1.56	UO	RUO
2	31.70	0.00	98.90	63.40	0.00	0.00	0.00	1.56	I	aucun
3	0.00	99.20	309.50	0.00	0.00	0.00	198.40	1.56	I	aucun
4	31.70	198.40	98.90	0.00	198.40	63.40	198.40	1.56	I	aucun
5	63.40	191.30	22.15	63.40	198.40	63.40	184.20	1.56	UO	RUO

3.2. Forme efficace

- ***Influence des coins arrondis***

Dans les sections avec coins arrondis, les largeurs plates théoriques b_p des éléments plans doivent être mesurées à partir des points milieux des angles adjacents, comme indiqué dans la figure 5.1 de l'EN 1993-1-3 :

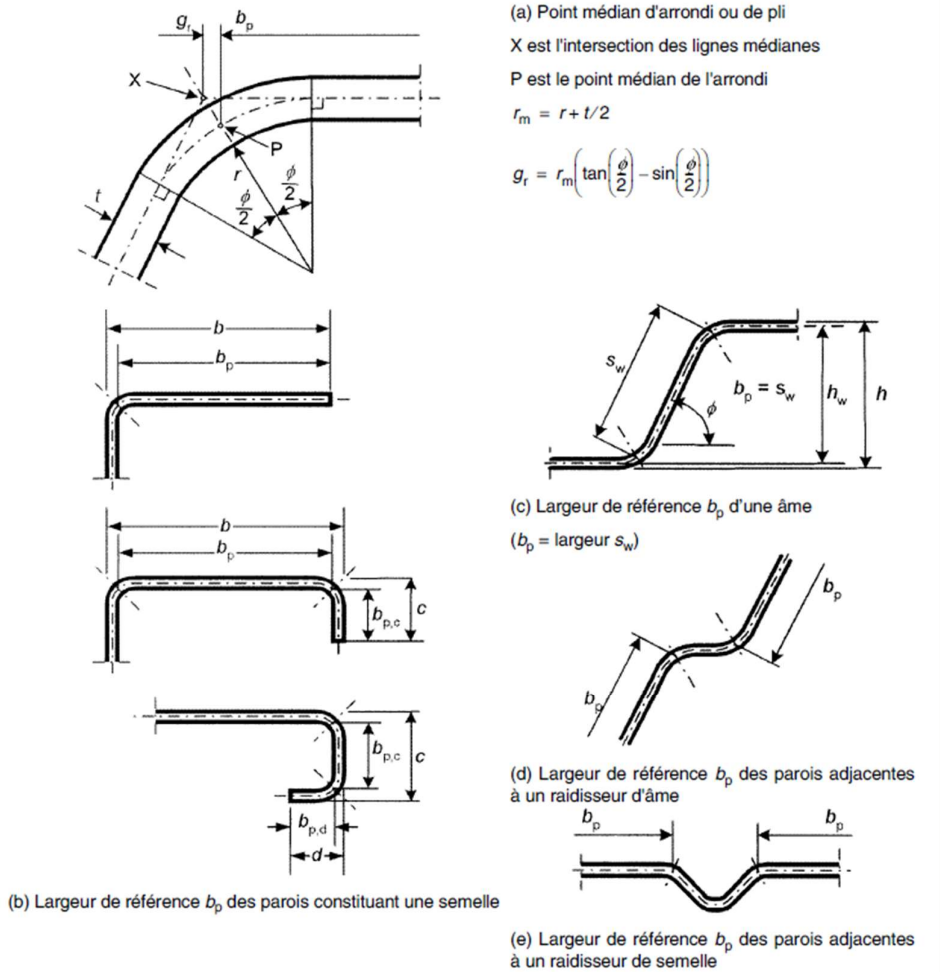


Figure 5.1 — Largeurs de référence des sections transversales de parois b_p tenant compte des rayons d'arrondi

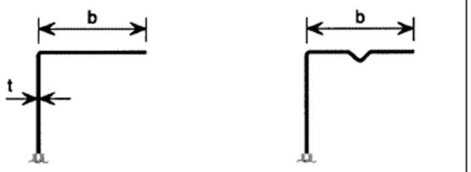
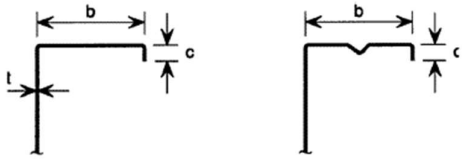
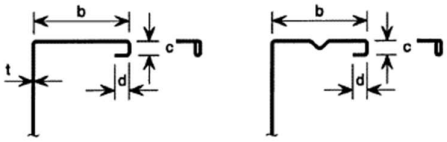
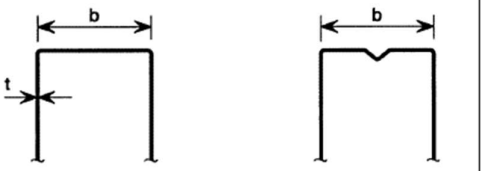
Ce principe est implémenté dans SCIA Engineer.

L'art. 5.1(3) de l'EN 1993-1-3 donne une procédure alternative pour calculer l'influence des coins arrondis, mais cette procédure approximative n'est pas supportée par SCIA Engineer. SCIA Engineer calculera toujours l'influence avec la procédure exacte.

- ***Proportions géométriques***

Les proportions géométriques sont vérifiées conformément à l'EN 1993-1-3, art. 5.2(1), tableau 5.1 :

Tableau 5.1 — Rapports maximum largeur sur épaisseur

Paroi de la section transversale	Valeur maximale
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45° \leq \phi \leq 90°$ $h/t \leq 500 \sin\phi$

Les limites pour les raidisseurs de bord (c) et les plis doubles de bord (d) sont contrôlées dans le cas où le bon type de raidisseur (RUO ou DEF) a été défini dans la forme initiale.

Aussi, les ratios limites donnés dans l'EN 1993-1-3, art. 5.2(2), sont vérifiés.

$$0{,}2 \leq c/b \leq 0{,}6$$

$$0{,}1 \leq d/b \leq 0{,}3$$

Dans l'art. 5.2(2), il est défini que si c/b < 0,2 ou d/b < 0,1, le raidisseur de bord peut être ignoré, mais dans SCIA Engineer, les dimensions c et d sont toujours comptabilisées et ne peuvent pas être ignorées.

De plus, l'art. 5.1(6) de l'EN 1993-1-3 donne une vérification sur le rayon interne :
« *Lorsque le rayon interne r > 0,04.t.E/f_y, il convient alors de déterminer la résistance de la section par des essais*. »

NB :
Si la valeur maximale des rapports largeur-épaisseur est dépassée, l'EN 1993-1-3 indique que les contrôles des aciers formés à froid peuvent toujours être effectués si les états limites sont vérifiés par un nombre approprié d'essais.
Si cette valeur maximale est dépassée dans SCIA Engineer, le programme affichera un message d'avertissement, mais effectuera néanmoins la vérification conformément à la norme EN 1993-1-3.

Exemple : 03.WS_CFS.esa

Effectuer le contrôle acier et lancer l'aperçu de la note.
Si c/b dépasse la valeur limite, un avertissement s'affiche.

Contrôle ELU EC-EN 1993

Valeur: $UC_{ensemble}$
Calcul linéaire
Cas de charge: LC1
Système de coordonnées: Principal
Extrême 1D: Elément
Sélection: Tout

Contrôle des profilés formés à froid selon l'EN 1993-1-3
Annexe Nationale: EN standard

Élément B1	**0.000 / 3.000 m**	**Cold formed C section (200; 80; 2; 6; 80)**	**Formé à froid**	**S280GD+ZA**	**LC1**	**0.53 -**

Coeff. partiels de sécurité		
Résistance des sections	γ_{M0}	1.00
Résistance à l'instabilité	γ_{M1}	1.00
Résistance en section nette	γ_{M2}	1.25

Avertissement: Le rapport des dimensions de la section est hors-limite : 0,2 <= c/b <= 0,6 (art. 5.2(2)).

Matériau			
Limite élastique	f_{yb}	280.0	MPa
Limite de rupture	f_u	360.0	MPa

- ***Proportion générale pour un élément***

Par défaut, l'EN 1993-1-3 spécifie que la contrainte f ($\sigma_{com,Ed}$) à utiliser pour le calcul de la section efficace, est donnée par :

$$f_y / \gamma_{M0}$$

La réduction d'un élément est généralement donnée par :

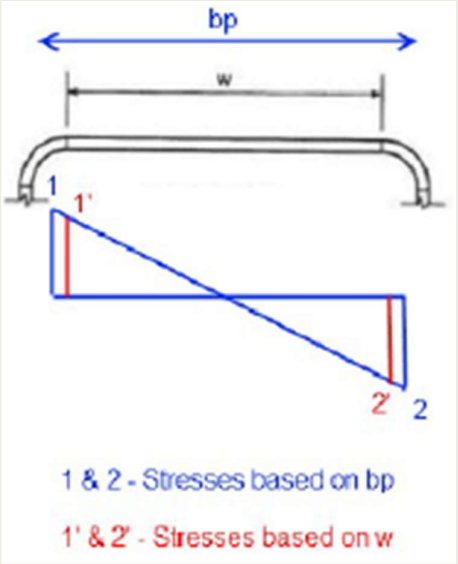
$$b_{eff} = \rho * b$$

Avec :

b_{eff} : largeur efficace
ρ : coefficient de réduction
b : largeur complète

Étape 1 :

Pour la contrainte f donnée, est calculée la contrainte normale sur l'élément plaque rectangulaire de la forme géométrique initiale. Ces contraintes sont calculées à partir de la largeur nominale b_p.



$\sigma_{début}$: contrainte normale au début de la section rectangulaire – la contrainte de compression est positive.
σ_{fin} : contrainte normale à la fin de la section rectangulaire – la contrainte de compression est positive.

Sir la forme rectangulaire est complètement sous traction, c'est-à-dire que les deux contraintes $\sigma_{début}$ et σ_{fin} sont toutes les deux en traction, aucune réduction n'est nécessaire : ρ = 1,0.

Étape 2 : déterminer f1 et f2 :

Cas où $|\sigma_{début}| \geq |\sigma_{fin}|$

$$f_1 = \sigma_{début}$$
$$f_2 = \sigma_{fin}$$

Cas où $|\sigma_{début}| < |\sigma_{fin}|$

$$f_1 = \sigma_{fin}$$
$$f_2 = \sigma_{début}$$

Étape 3 : calculer le gradient de contraintes ψ :

$$\psi = \frac{f_2}{f_1}$$

Étape 4 : calculer le gradient de contraintes ψ :

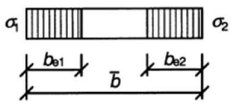
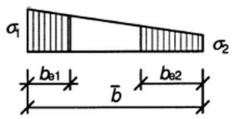
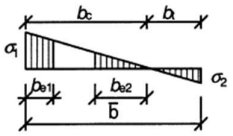
Si ψ = 1, l'élément est sous compression uniforme, sinon l'élément est soumis à un gradient de contraintes.

En fonction du gradient de contraintes et du type d'élément, la largeur efficace peut être calculé comme spécifié dans les paragraphes suivants :

- ***Éléments internes en compression***

La largeur efficace des éléments internes en compression est calculée conformément à l'EN 1993-1-5, art. 4.4 et tableau 4.1.
Cela s'applique aux éléments de type I. La largeur théorique b_p est utilisé comme $\bar{b}$.

Tableau 4.1 — Parois comprimées internes

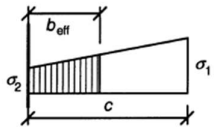
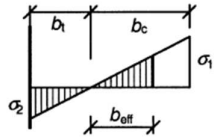
Répartition des contraintes (compression positive)	**Largeur efficace[p]** b_{eff}
	$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho\, \bar{b}$ $b_{e1} = 0{,}5\, b_{eff}$ $\quad b_{e2} = 0{,}5\, b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\, \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$ $\quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, \bar{b}\ /(1-\psi)$ $b_{e1} = 0{,}4\, b_{eff}$ $\quad b_{e2} = 0{,}6\, b_{eff}$

$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Coefficient de voilement k_σ	4,0	$8{,}2/(1{,}05 + \psi)$	7,81	$7{,}81 - 6{,}29\psi + 9{,}78\,\psi^2$	23,9	$5{,}98\,(1-\psi)^2$

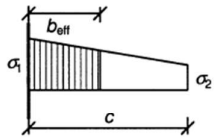
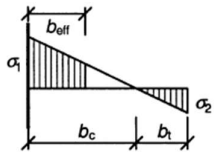
- ***Éléments externes en compression***

La largeur efficace des éléments externes en compression est calculée conformément à l'EN 1993-1-5, art. 4.4 et tableau 4.2.
Cela s'applique aux éléments de type UO et SO. La largeur théorique b_p est utilisé comme c.

Tableau 4.2 — Parois comprimées en console

Répartition des contraintes (compression positive)	**Largeur efficace[p]** b_{eff}
	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\, c$
	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, c / (1 - \psi)$

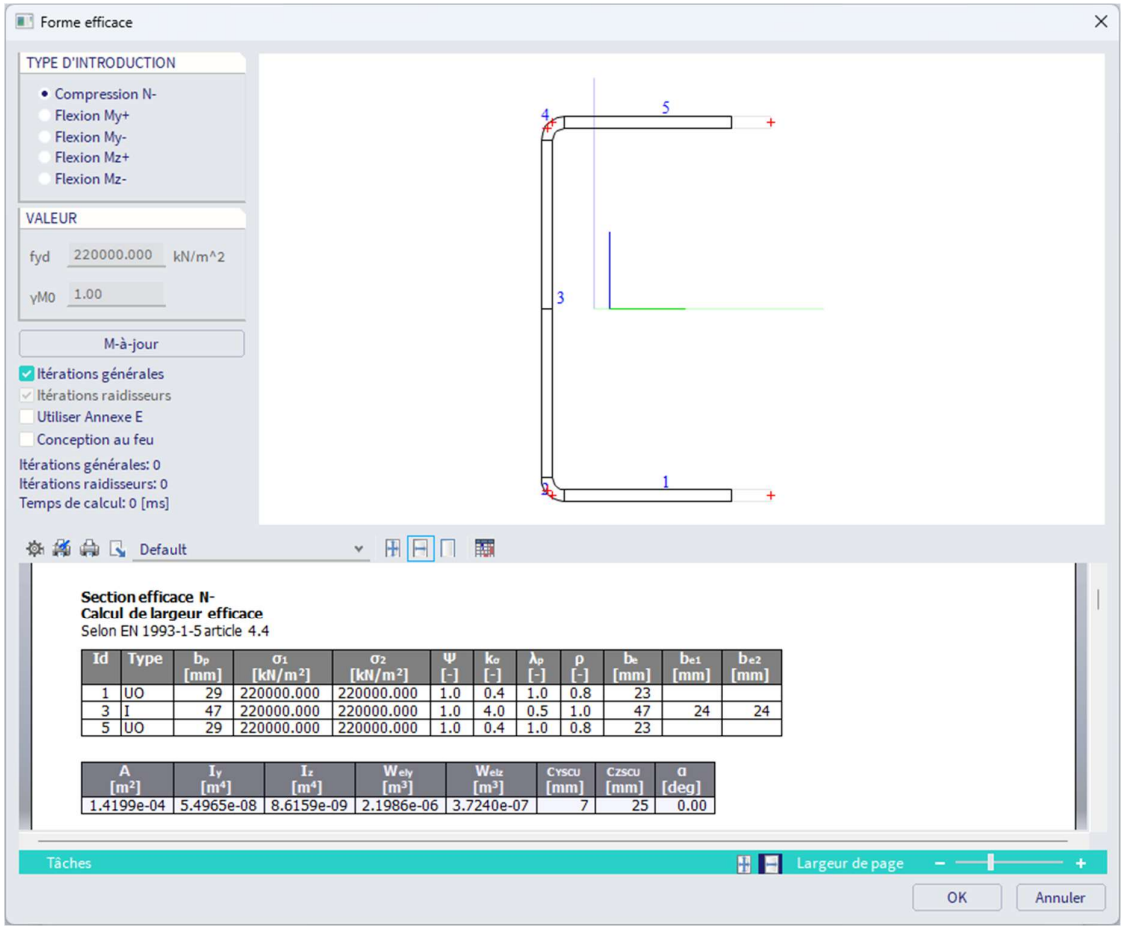
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	– 1	$1 \geq \psi \geq -3$
Coefficient de voilement k_σ	0,43	0,57	0,85	$0{,}57 - 0{,}21\psi + 0{,}07\psi^2$

	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\, c$
	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, c / (1 - \psi)$

$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	– 1
Coefficient de voilement k_σ	0,43	$0{,}578 / (\psi + 0{,}34)$	1,70	$1{,}7 - 5\psi + 17{,}1\psi^2$	23,8

Exemple : 04.WS_CFS.esa

Dans l'éditeur de section, cliquer sur « Forme efficace ».



Id	Type	b_p [mm]	σ_1 [kN/m²]	σ_2 [kN/m²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	UO	29	220000.000	220000.000	1.0	0.4	1.0	0.8	23		
3	I	47	220000.000	220000.000	1.0	4.0	0.5	1.0	47	24	24
5	UO	29	220000.000	220000.000	1.0	0.4	1.0	0.8	23		

A [m²]	I_y [m⁴]	I_z [m⁴]	W_{ely} [m³]	W_{elz} [m³]	c_{YSCU} [mm]	c_{ZSCU} [mm]	α [deg]
1.4199e-04	5.4965e-08	8.6159e-09	2.1986e-06	3.7240e-07	7	25	0.00

- ***Méthode générale pour éléments plans avec raidisseurs de bord ou intermédiaires***

L'art. 5.5.3.1 de l'EN 1993-1-3 donne la méthode générale pour les éléments plans avec raidisseurs de bord ou intermédiaires.

Le calcul des éléments en compression avec raidisseurs de bord ou intermédiaires doit être basé sur l'hypothèse que le raidisseur se comporte comme des éléments en compression avec une contrainte partielle continue, avec une rigidité du ressort qui dépend des conditions aux limites et de la raideur flexionnelle des éléments plans adjacents.

La rigidité du ressort par longueur unitaire peut être déterminée par :

$$K = {}^{u}/_{\delta}$$

Où δ est la flèche du raidisseur due à la charge unitaire u agissant au centre (b_1) de la partie efficace de la section.

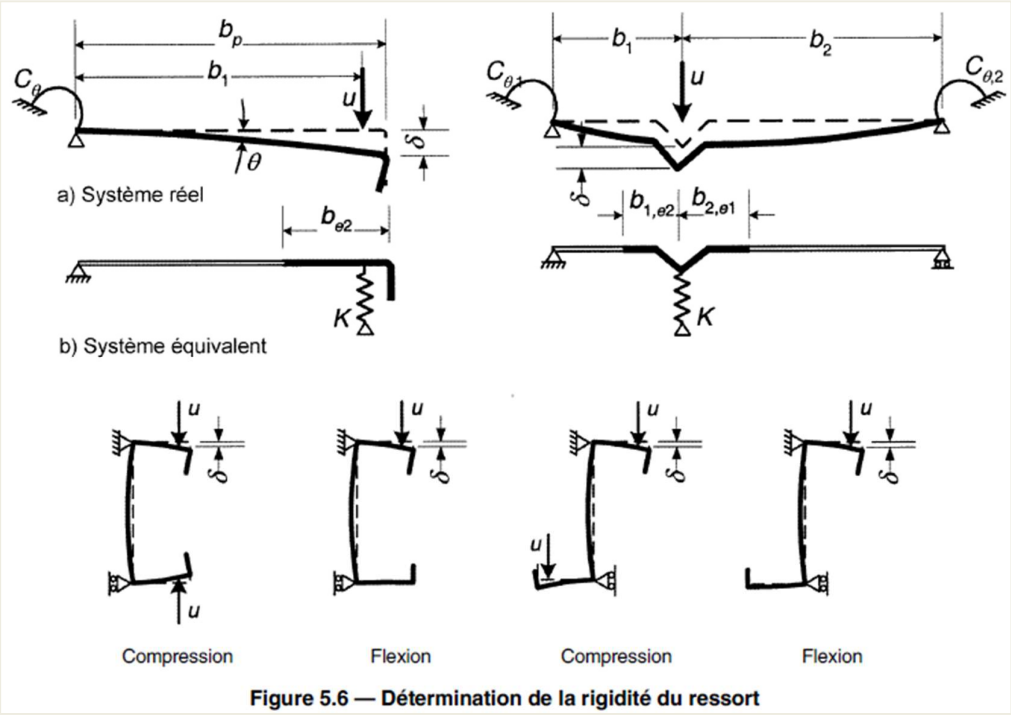


Figure 5.6 — Détermination de la rigidité du ressort

Dans le cas de raidisseurs de bord pour les sections C et Z avec retours, C_θ doit être déterminé avec la charge unitaire u appliquée comme dans la figure ci-dessus. Il en résulte l'expression ci-dessous pour la rigidité K du ressort pour l'aile 1 :

$$K = \frac{E.t^3}{4.(1-\nu^2)} . \frac{1}{b_1^2.h_w + 0{,}5.b_1.b_2.h_w.k_f}$$

Avec :

- b_1 : cf figure ci-dessus
- b_2 : cf figure ci-dessus
- h_w : épaisseur de l'âme

- $k_f = 0$: si la semelle 2 est en traction (ex. d'une poutre en flexion autour de l'axe yy)
- $k_f = A_{s2} / A_{s1}$: si la semelle 2 est en compression (ex. d'une poutre en compression axiale)
- $k_f = 1$: pour une section symétrique en compression
- A_{s2} et A_{s1} : aire efficace du raidisseur de bord (incluant la partie efficace b_{e2} de l'aile (cf figure précédente), de l'aile 1 et l'aile 2 respectivement).

NB : *Cette formule de K (donnée dans l'EN 1993-1-3) est basée sur des sections simples avec deux ailes. Dans le cas de sections plus complexes, la seule procédure exacte consiste à effectuer une analyse numérique (méthode des bandes finies) afin de déterminer les contraintes critiques de flambement local et flambement par distorsion. Cette approche est mentionnée dans l'article 5.5.1(7) « Procédure générale ». Cette méthode est prise en charge par SCIA Engineer à l'aide des propriétés de la section.*

- ***Procédure avancée***

En plus des procédures classiques décrites précédemment dans les différents cas pour le calcul de la forme efficace, la procédure avancée décrite dans l'EN 1993-1-3, art. 5.5.1(7) est supportée.

Cette procédure n'utilise pas de formules analytiques pour calculer les contraintes de flambement critiques locales et en distorsion des différents éléments, mais utilise à la place les valeurs obtenues par une analyse (en stabilité) numérique.

Lorsque ce paramètre est activé dans la section, l'utilisateur peut saisir les contraintes de flambement minimales locales et en distorsion, obtenues à partir d'une analyse numérique pour les différentes formes efficaces. Ces contraintes sont utilisées pour le calcul des largeurs efficaces et des épaisseurs.

Ci-dessous un aperçu des différentes étapes dans de tels cas :

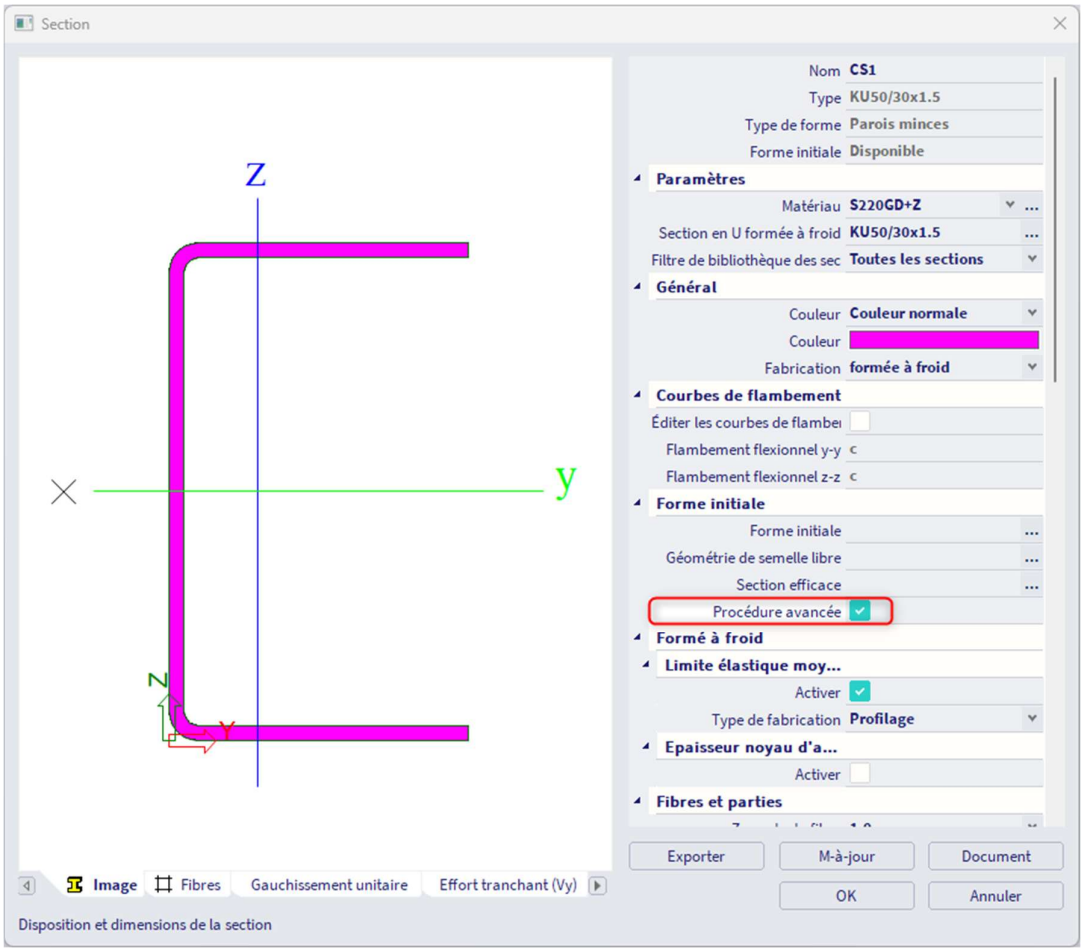
1) Calcul des contraintes de flambement élastiques et identification des modes de flambement correspondant.

2) Calcul des largeurs efficaces selon l'art. 5.5.2 pour les parties de sections qui flambent localement, à partir de la contrainte de flambement local minimum.

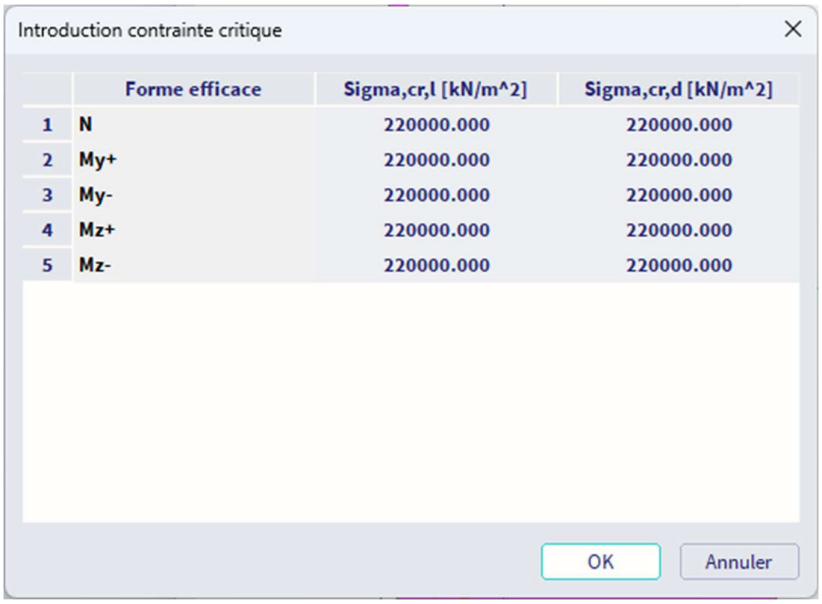
3) Calcul des épaisseurs réduites (cf art. 5.5.3.1(7)) des raidisseurs de bord ou intermédiaires, à partir de la contrainte de flambement en distorsion minimum.

4) Calcul de la résistance de flambement d'ensemble selon l'art. 6.2, à partir de la section efficace depuis les étapes 2 et 3.

Dans SCIA Engineer, cette procédure avancée peut être utilisée en cochant l'option dans les propriétés de la section.



Ensuite, l'utilisateur doit insérer les contraintes de flambement élastiques manuellement :



- ***Éléments plans avec raidisseurs de bord***

La procédure pour déterminer les épaisseurs / largeurs efficaces des éléments plans avec raidisseurs de bord est donnée dans l'EN1993-1-3 art. 5.5.3.2 et 5.5.3.1.

Cela s'applique aux éléments de type RUO et DEF.

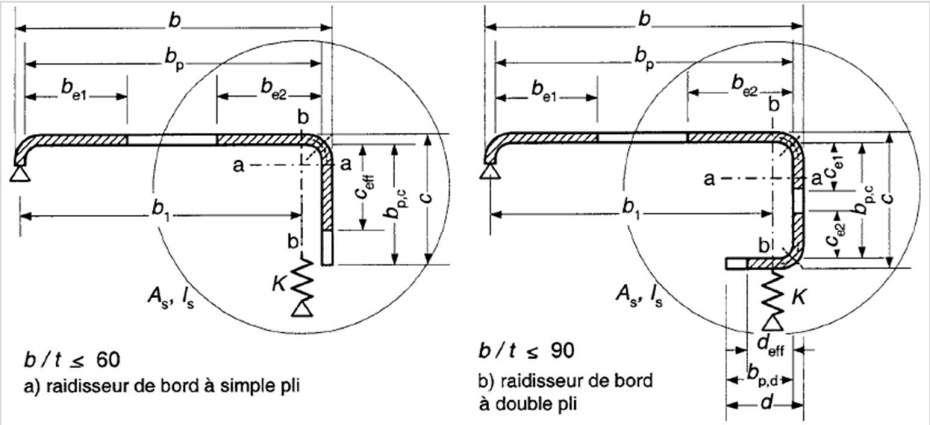


Figure 5.7 — Raidisseurs de bord

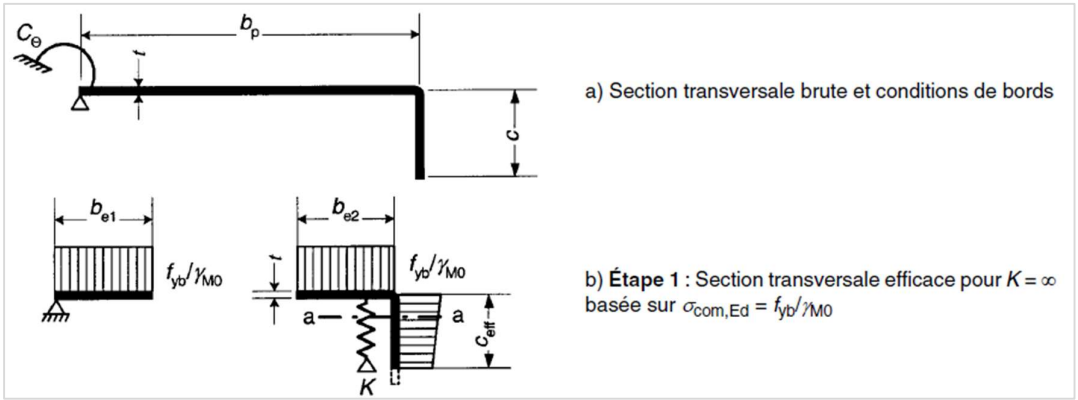
Procédure :

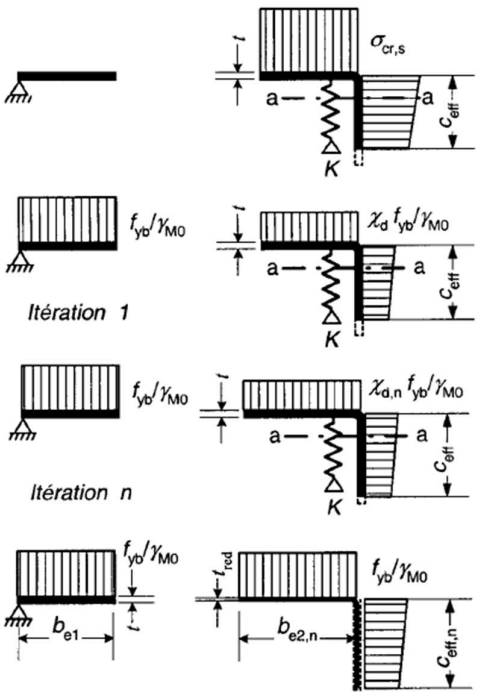
- Étape 1 : Déterminer une section initiale efficace du raidisseur en utilisant les largeurs efficaces calculées en supposant que le raidisseur assure un maintien (ou un appui) complet et que :

$$\sigma_{com,Ed} = {}^{f_{yb}}/_{\gamma_{M0}}$$

- Étape 2 : Utiliser la section initiale efficace du raidisseur pour déterminer le coefficient de réduction dû au flambement distorsionnel, en tenant compte des effets du maintien élastique continu.

- Étape 3 : Éventuellement, procéder par itérations afin d'affiner la valeur du facteur de réduction du flambement du raidisseur.





c) **Étape 2** : Contrainte critique élastique $\sigma_{cr,s}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s résultant de l'étape 1

d) Résistance réduite $\chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s, tenant compte du coefficient de réduction χ_d basé sur $\sigma_{cr,s}$

e) **Étape 3** : Facultativement, répéter l'étape 1 en calculant la largeur efficace avec une contrainte de compression réduite $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$ avec χ_d obtenue par l'itération précédente, en poursuivant jusqu'à $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$ mais $\chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$.

f) Adopter une section transversale efficace avec b_{e2}, c_{eff} et l'épaisseur réduite t_{red} correspondant à $\chi_{d,n}$

Figure 5.8 — Résistance à la compression d'une semelle munie d'un raidisseur de bord

Étape 1 :

Calculer la largeur efficace avec l'EN 1993-1-5, art. 4.4 et tableau 4.1

(2) The reduction factor ρ may be taken as follows:

- internal compression elements:

$\rho = 1{,}0$ for $\bar{\lambda}_p \leq 0{,}673$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}055\,(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1{,}0 \quad \text{for } \bar{\lambda}_p > 0{,}673 \text{ , where } (3+\psi) \geq 0 \qquad (4.2)$$

- outstand compression elements:

$\rho = 1{,}0$ for $\bar{\lambda}_p \leq 0{,}748$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1{,}0 \quad \text{for } \bar{\lambda}_p > 0{,}748 \qquad (4.3)$$

where $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\,\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$

Dans le cas d'un raidisseur de bord à un seul pli :

$$c_{eff} = \rho . b_{p,c}$$

ρ est obtenu conformément à l'EN 1993-1-5, (avec la largeur conventionnelle b_p qui est utilisée égale à $\bar{b}$), à l'exception de la valeur du coefficient de flambement k_σ qui est donnée par les expressions suivantes :

si $b_{p,c} / b_p \leq 0{,}35$ alors $k_\sigma = 0{,}35$

si $0{,}35 < b_{p,c} / b_p \leq 0{,}6$ alors $k_\sigma = 0{,}5 + 0{,}83\sqrt[3]{(b_{p,c}/b_p - 0{,}35)^2}$

Dans le cas d'un raidisseur de bord à double pli :

$$c_{eff} = \rho . b_{p,c}$$

ρ et k_σ sont obtenus conformément à l'EN 1993-1-5, tableau 4.1, (avec la largeur conventionnelle b_p qui est utilisée égale à $\bar{b}$).

$$d_{eff} = \rho . b_{p,d}$$

ρ et k_σ sont obtenus conformément à l'EN 1993-1-5, tableau 4.2, (avec la largeur conventionnelle b_p qui est utilisée égale à $\bar{b}$).

si $0{,}35 < b_{p,c} / b_p \leq 0{,}6$ alors $k_\sigma = 0{,}5 + 0{,}83\sqrt[3]{(b_{p,c}/b_p - 0{,}35)^2}$

Étape 2 :

L'aire efficace de la section du raidisseur de bord, A_s, est calculée correctement, en utilisant la valeur exacte de b_p.
La contrainte critique élastique de flambement est alors donnée par :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{K . E . I_s}}{A_s}$$

Étape 3 (alternatif) :

La réduction χ_d pour la résistance au flambement en distorsion d'un raidisseur de bord (flambement en flexion), doit être issue de la valeur de $\sigma_{cr,s}$.
Ce coefficient est issu de l'élancement relatif $\bar{\lambda}_d$:

$\chi_d = 1$	si	$\bar{\lambda}_d \leq 0{,}65$
$\chi_d = 1{,}47 - 0{,}723.\bar{\lambda}_d$	si	$0{,}65 < \bar{\lambda}_d < 1{,}38$
$\chi_d = 0{,}66 / \bar{\lambda}_d$	si	$\bar{\lambda}_d \geq 1{,}38$

Avec:

$$\bar{\lambda}_d \geq \sqrt{f_y/\sigma_{cr,s}}$$

Si χ_d < 1,0, le calcul peut être affiné par itérations, en utilisant comme valeurs initiales les valeurs de ρ obtenues par $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$, soit :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p\sqrt{\chi_d}$$

L'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement en flexion doit être prise égale à :

$$A_{s,red} = \chi_d A_s . \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed,i}}$$

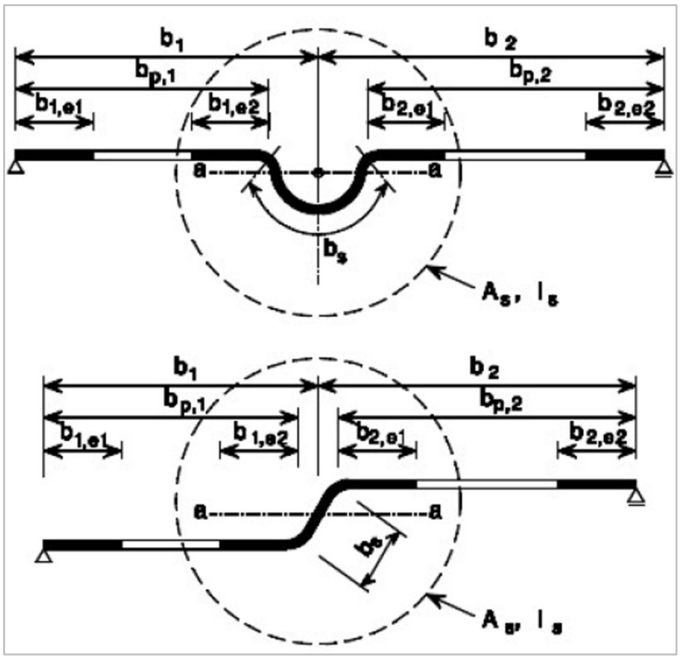
Conclusion :

Pour la détermination des caractéristiques de la section efficace, l'aire efficace réduite du raidisseur, $A_{s,red}$, doit être représentée en utilisant une épaisseur réduite t_{red} pour tous les éléments constituant A_s **:**

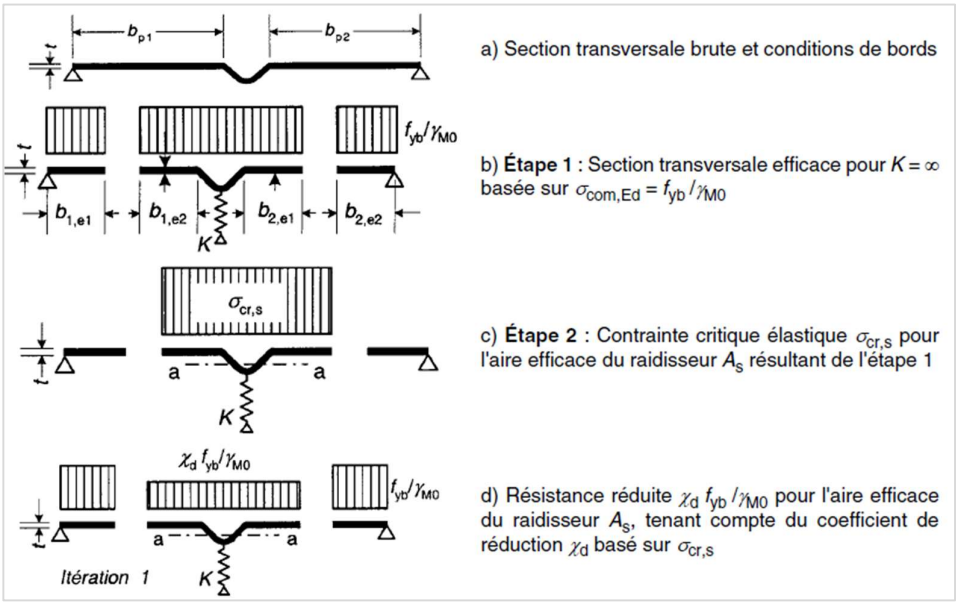
$$t_{red} = t \frac{A_{s,red}}{A_s}$$

- ***Éléments plans avec raidisseurs intermédiaires***

La procédure pour calculer la largeur/épaisseur efficace des éléments avec raidisseurs intermédiaires est donnée dans l'EN 1993-1-3, art. 5.5.3.3 et 5.5.3.1.
Cela s'applique aux éléments de type RI.



Le principe est également présenté sur la figure ci-dessous :

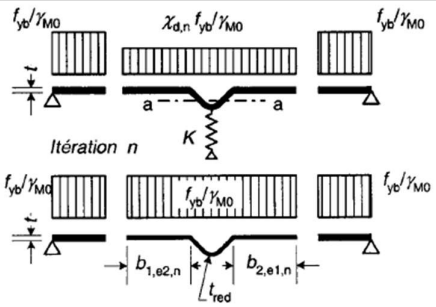


a) Section transversale brute et conditions de bords

b) **Étape 1** : Section transversale efficace pour $K = \infty$ basée sur $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}$

c) **Étape 2** : Contrainte critique élastique $\sigma_{cr,s}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s résultant de l'étape 1

d) Résistance réduite $\chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s, tenant compte du coefficient de réduction χ_d basé sur $\sigma_{cr,s}$



e) **Étape 3** : Facultativement, répéter l'étape 1 en calculant la largeur efficace avec une contrainte de compression réduite $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$ avec χ_d obtenu par l'itération précédente, en poursuivant jusqu'à $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$ mais $\chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$.

f) Adopter une section transversale efficace avec $b_{1,e2}$, $b_{2,e1}$ et l'épaisseur réduite t_{red} correspondant à $\chi_{d,n}$

Étape 1 :

Déterminer la largeur efficace avec l'EN 1993-1-5 art. 4.4 et tableau 4.1.

(2) Le coefficient réducteur ρ peut être considéré comme suit :

— parois comprimées internes :

$$\rho = 1{,}0 \qquad \text{pour } \bar{\lambda}_p \leq 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055\psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1{,}0 \qquad \text{pour } \bar{\lambda}_p > 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055\psi} \qquad \text{... (4.2)}$$

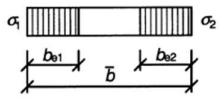
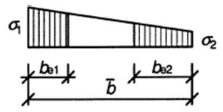
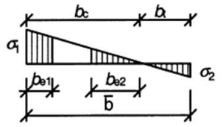
— parois comprimées en console :

$$\rho = 1{,}0 \qquad \text{pour } \bar{\lambda}_p \leq 0{,}748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1{,}0 \qquad \text{pour } \bar{\lambda}_p > 0{,}748 \qquad \text{... (4.3)}$$

avec $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$

Tableau 4.1 — Parois comprimées internes

Répartition des contraintes (compression positive)	**Largeur efficace[p]** b_{eff}
	$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho\,\bar{b}$ $b_{e1} = 0{,}5\, b_{eff}$ $\quad b_{e2} = 0{,}5\, b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\,\bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$ $\quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\,\bar{b}/(1-\psi)$ $b_{e1} = 0{,}4\, b_{eff}$ $\quad b_{e2} = 0{,}6\, b_{eff}$

$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Coefficient de voilement k_σ	4,0	$8{,}2/(1{,}05+\psi)$	7,81	$7{,}81 - 6{,}29\psi + 9{,}78\,\psi^2$	23,9	$5{,}98\,(1-\psi)^2$

L'aire efficace de la section du raidisseur de bord, A_s, est calculée correctement dans SCIA Engineer en utilisant la section réelle.

Étape 2 :

La contrainte critique élastique de flambement est donnée par :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{K.E.I_s}}{A_s}$$

La réduction χ_d pour la résistance au flambement en distorsion d'un raidisseur de bord (flambement en flexion), doit être issue de la valeur de $\sigma_{cr,s}$.
Ce coefficient est issu de l'élancement relatif $\bar{\lambda}_d$:

$\chi_d = 1$	si	$\bar{\lambda}_d \leq 0{,}65$
$\chi_d = 1{,}47 - 0{,}723.\bar{\lambda}_d$	si	$0{,}65 < \bar{\lambda}_d < 1{,}38$
$\chi_d = 0{,}66 / \bar{\lambda}_d$	si	$\bar{\lambda}_d \geq 1{,}38$

Avec:

$$\bar{\lambda}_d \geq \sqrt{f_y/\sigma_{cr,s}}$$

Étape 3 (alternatif) :

Si χ_d < 1,0, le calcul peut être affiné par itérations, en utilisant comme valeurs initiales les valeurs de ρ obtenues par $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$, soit :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p\sqrt{\chi_d}$$

L'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement en flexion doit être prise égale à :

$$A_{s,red} = \chi_d A_s.\frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed,i}}$$

Conclusion :

Pour la détermination des caractéristiques de la section efficace, l'aire efficace réduite du raidisseur, $A_{s,red}$, doit être représentée en utilisant une épaisseur réduite t_{red} pour tous les éléments constituant A_s **:**

$$t_{red} = t\,\frac{A_{s,red}}{A_s}$$

3.3. Procédure générale du calcul de la forme efficace

Les propriétés de la section brute sont utilisées pour calculer les efforts internes et les déformations.

La procédure générale qui combine le calcul efficace des éléments plans sans et avec raidisseurs, est donnée dans l'EN 1993-1-3, art. 5.5.2(3) et 5.5.3.

Cette procédure peut s'écrire comme suit :

- Étape 1 : La largeur efficace des ailes et les raidisseurs de bord / intermédiaire dans les ailes sont calculés à partir des propriétés de la section brute.

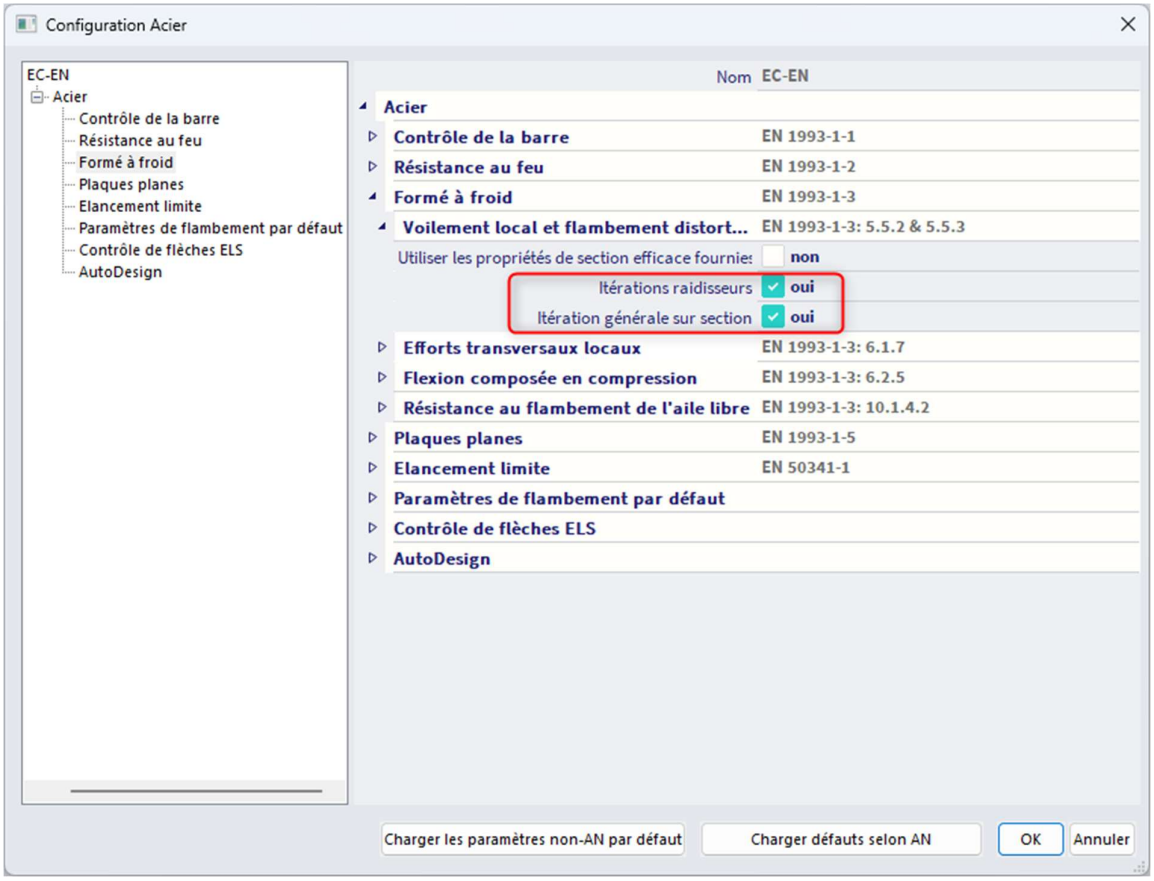
  Cela inclue la procédure itérative optionnelle pour les raidisseurs de bord / intermédiaires.

- Étape 2 : Cette forme efficace partielle de l'étage précédente est utilisée pour déterminer le gradient de contraintes et la largeur efficace de l'âme.
  Cela inclue la procédure itérative optionnelle pour les raidisseurs intermédiaires.

- Étape 3 : Le résultat final des deux étapes précédentes est que la section efficace et ses propriétés peuvent être calculées.

- Étape 4 : Ce processus peut maintenant être itéré de manière optionnel en utilisant le ratio de contraintes à partir de la section efficace plutôt que la section brute.

Les deux procédures itératives (itération des raidisseurs et itération de la section complète) peuvent être définies dans la « Configuration acier » :

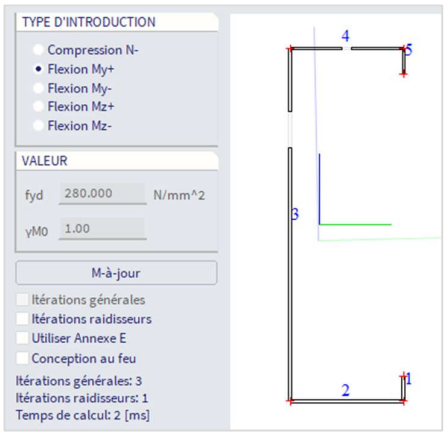


Exemple : 02.WS_CFS.esa

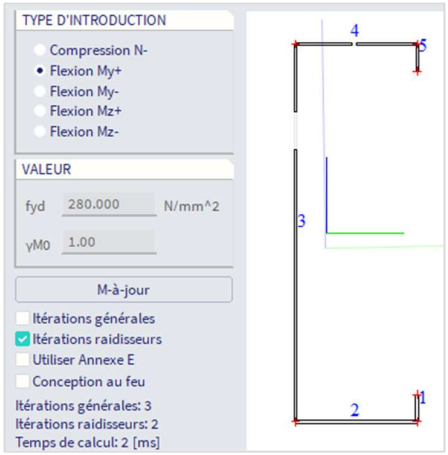
Dans cet exemple, sont présentées les différences entre les options « Itérations raidisseur » et « Itérations complètes ».

Regardons la section CS2 – Flexion positive autour de l'axe yy :

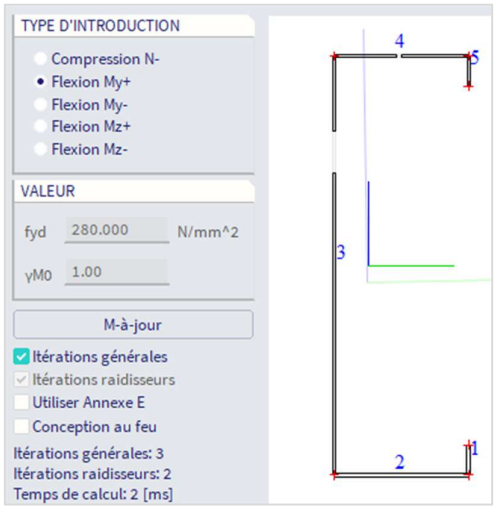









Voilement local et flambement disto...
EN 1993-1-3: 5.5.2 & 5.5.3
Utiliser les propriétés de section efficace fourni
non
Itérations raidisseurs
oui
Itération générale sur section
oui


TYPE D'INTRODUCTION
Compression N-
Flexion My+
Flexion My-
Flexion Mz+
Flexion Mz-
VALEUR
fyd
280.000
N/mm^2
γM0
1.00
M-à-jour
Itérations générales
Itérations raidisseurs
Utiliser Annexe E
Conception au feu
Itérations générales: 3
Itérations raidisseurs: 2
Temps de calcul: 2 [ms]
4
5
3
2
1

Chapitre 4: SECTIONS GÉNÉRALES

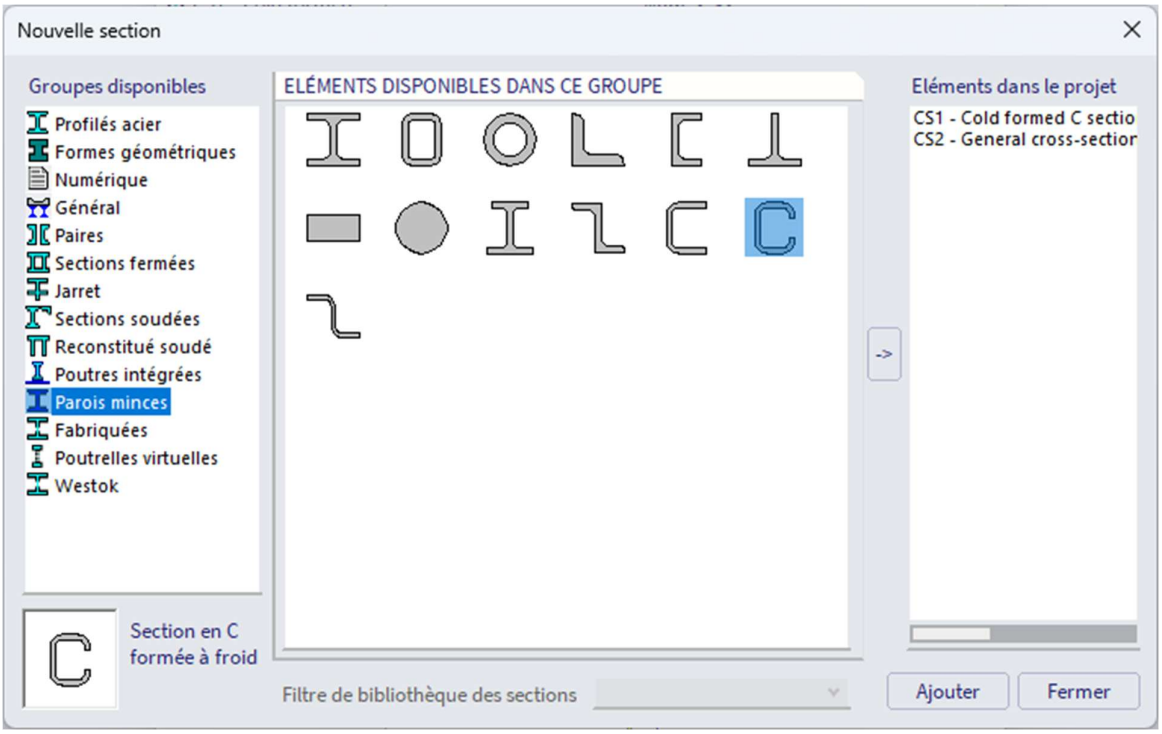
En plus des profilés en acier formé à froid disponibles dans la bibliothèque de sections de SCIA Engineer, l'utilisateur peut créer ses propres sections formées à froid personnalisées dans SCIA Engineer.

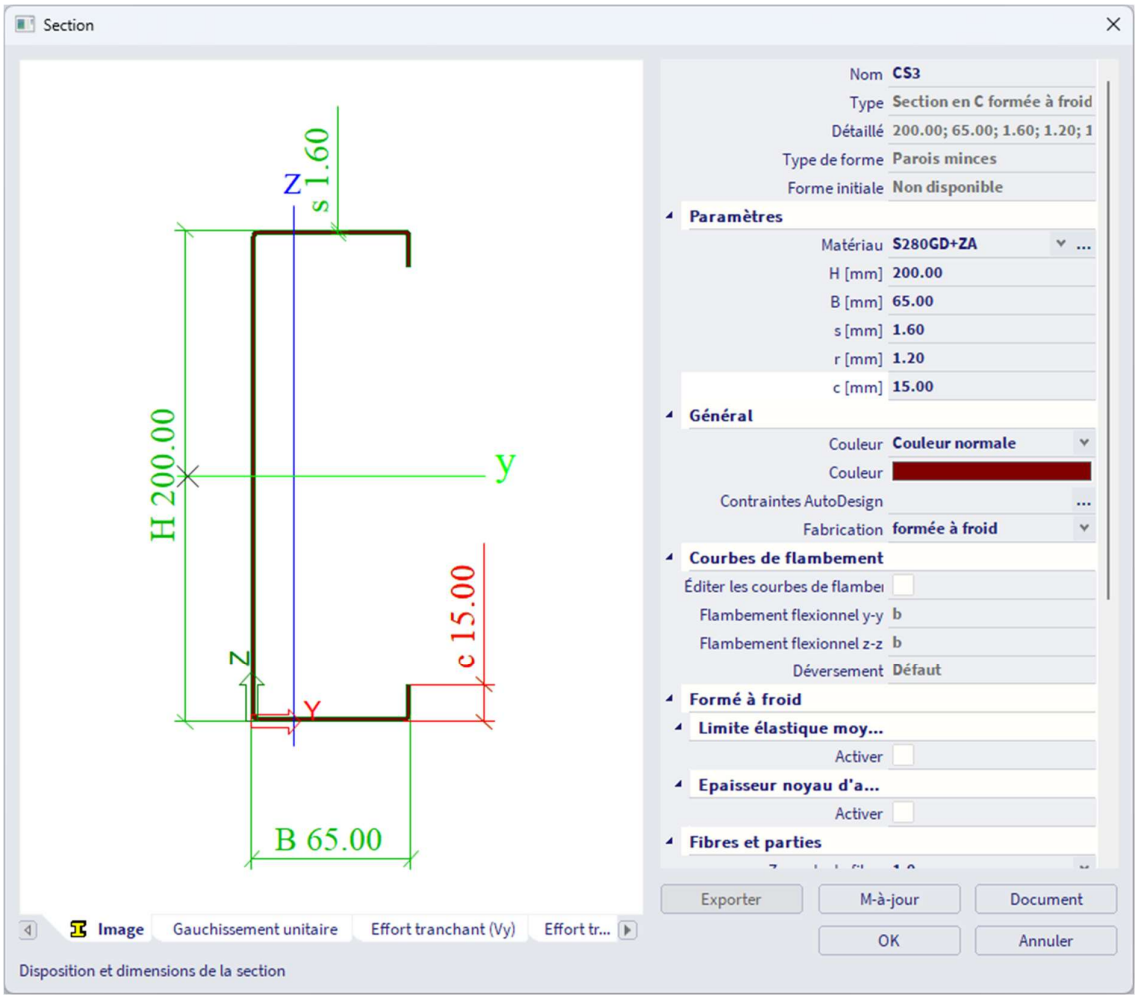
Cela peut se faire de deux manières :

- Par l'option « Paroi mince »
- Par l'option « Général » (en utilisant des fichiers DWG/DXF)

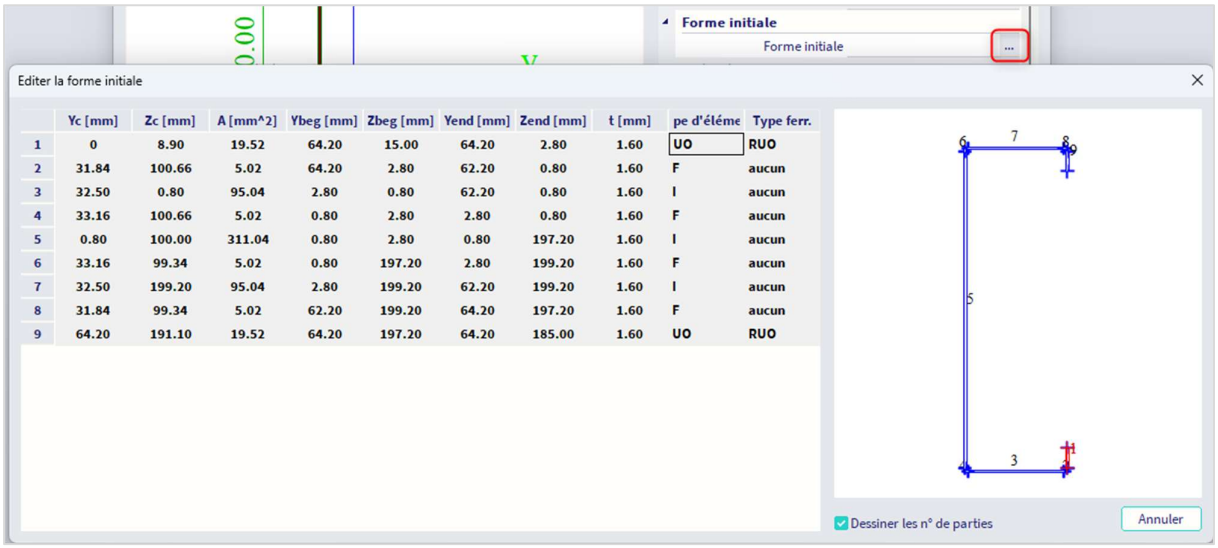
4.1. Option « Paroi mince »

Via cette option, l'utilisateur peut sélectionner la forme de section et insérer toutes les propriétés de dimension manuellement :



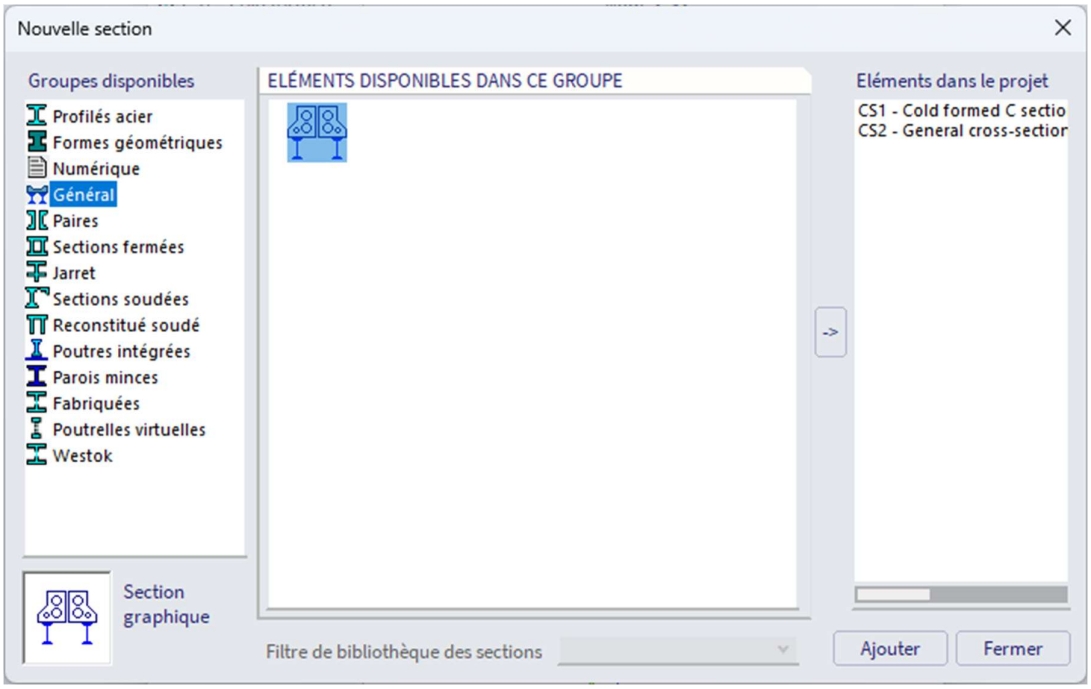


En utilisant cette option, la fabrication est par défaut définie sur « Formée à froid ». En cliquant sur « Mettre à jour », SCIA Engineer calculera automatiquement les propriétés de la section brute, de même que la forme initiale :



4.2. Import depuis un fichier DWG / DXF

L'autre option consiste à dessiner manuellement la forme de la section en utilisant l'option « Général » :



Dans l' « éditeur de sections », l'utilisateur peut dessiner une nouvelle section. Elle peut être faite à partir :

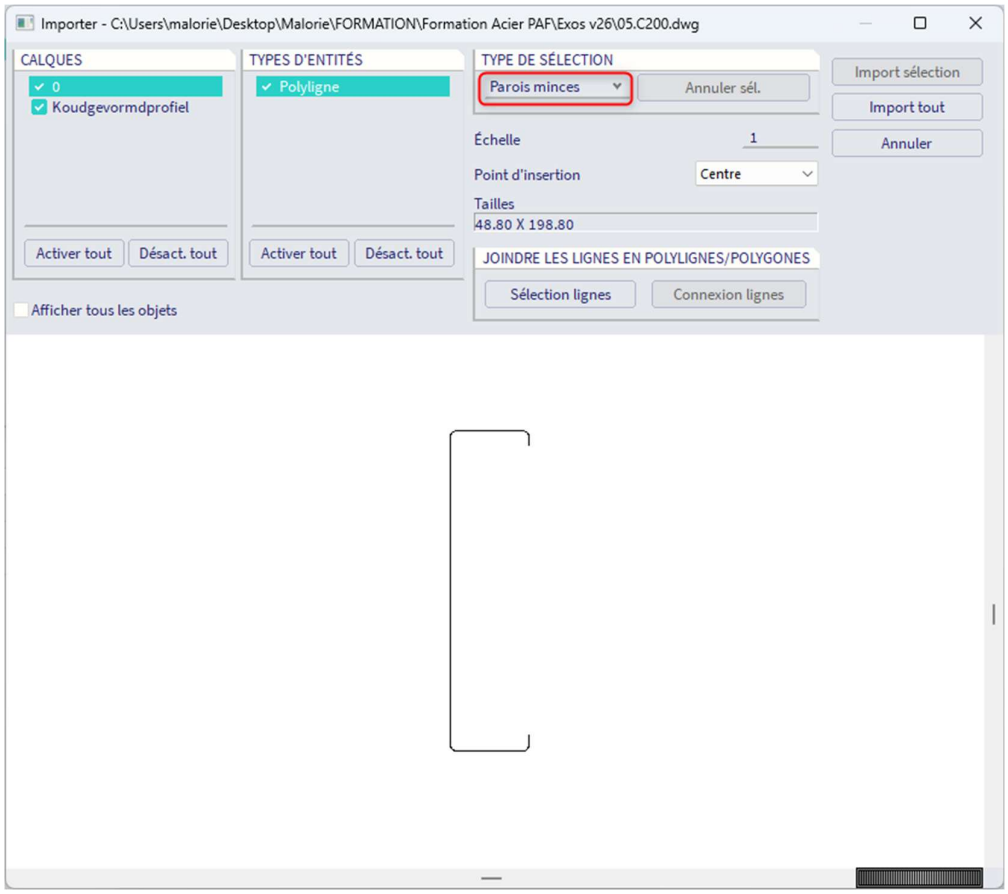
- D'un polygone (avec ou sans ouverture)
- D'une paroi mince
- D'une section de la bibliothèque
- D'un import DXF/DWG

Dans l'exemple ci-dessous, l'utilisation d'un fichier DWG est détaillée :

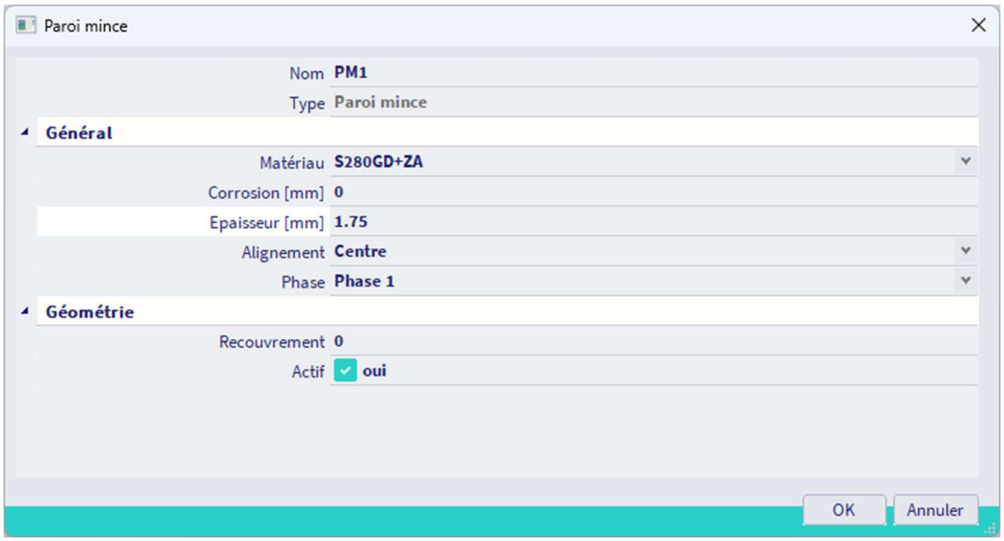
1) Créer un nouveau projet SCIA Engineer en utilisant le matériau acier.
2) Créer une nouvelle section via l'option « Général ».
3) Utiliser l'option « Import DXF/DWG » pour importer le fichier dwg « 05.C200.dwg » :



4) Sélectionner l'option « Paroi mince » dans le mode de sélection :



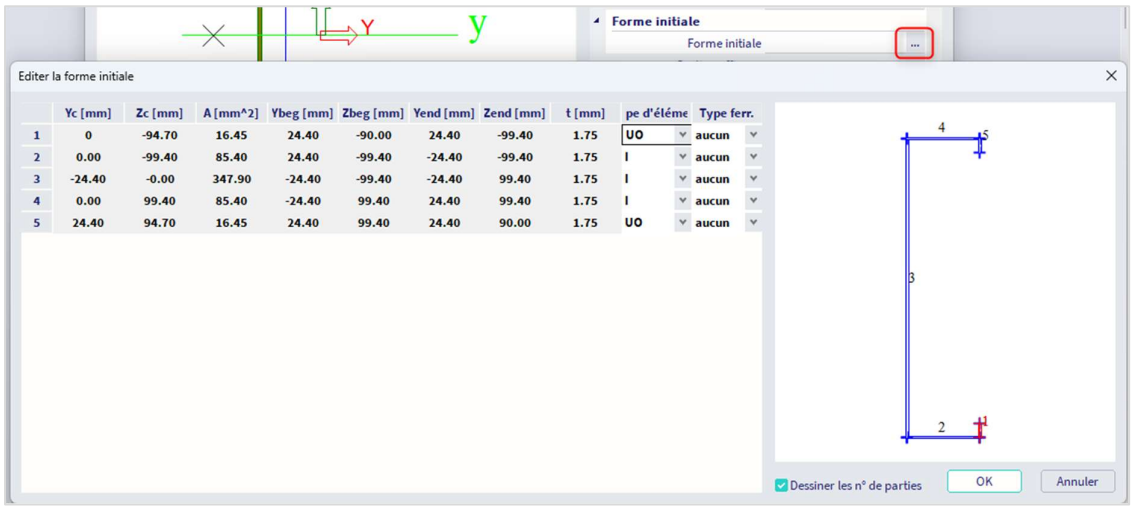
5) Cliquer sur « Importer tout ».
6) Les propriétés de la paroi mince sont maintenant disponibles :



Ici vous pouvez sélectionner le matériau acier et insérer l'épaisseur de la section.
Cliquer ensuite sur « OK » et insérer la section au point 0;0.

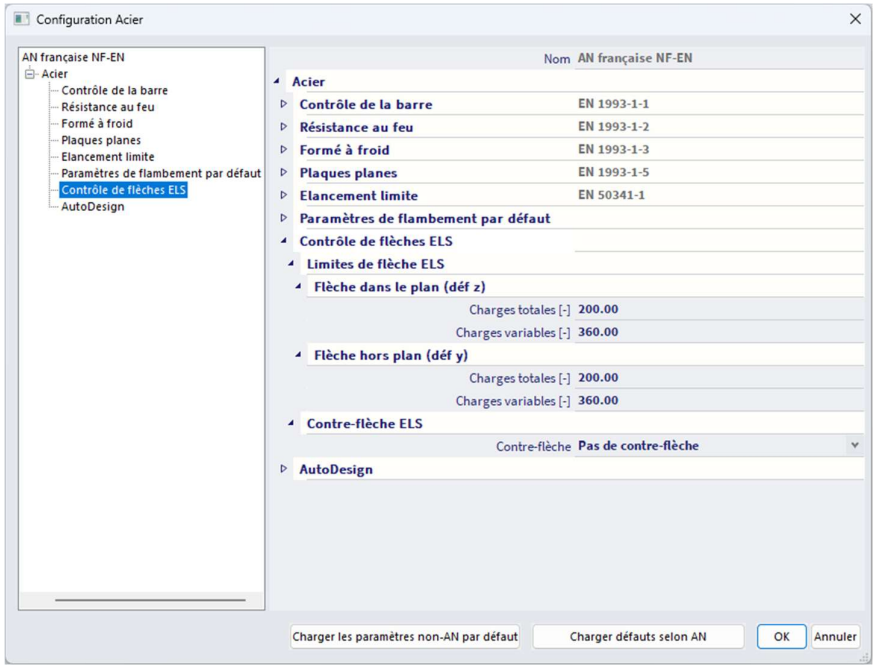
7) Fermer l'éditeur de sections pour revenir sur la fenêtre des propriétés de la section.
Définir la « Fabrication » comme « Formée à froid » et cliquer sur « Mettre à jour ». Maintenant toutes les propriétés de la section sont automatiquement calculées par SCIA Engineer.

8) Cliquer sur « Forme initiale » et vérifier les différentes parties de la section pour le calcul de la section efficace.

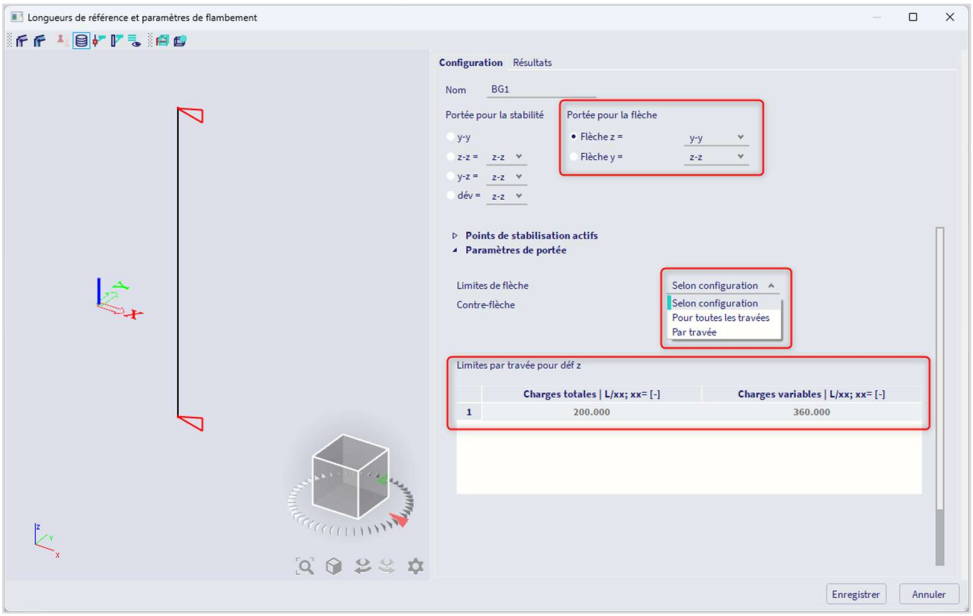


Chapitre 5: CONTRÔLES ELS

Dans la « Configuration acier », l'utilisateur peut définir des limites relatives générales en déformation, qui sont celles par défaut pout tous les éléments du projet. Ces limites sont à définir pour les charges totales et variables séparément :



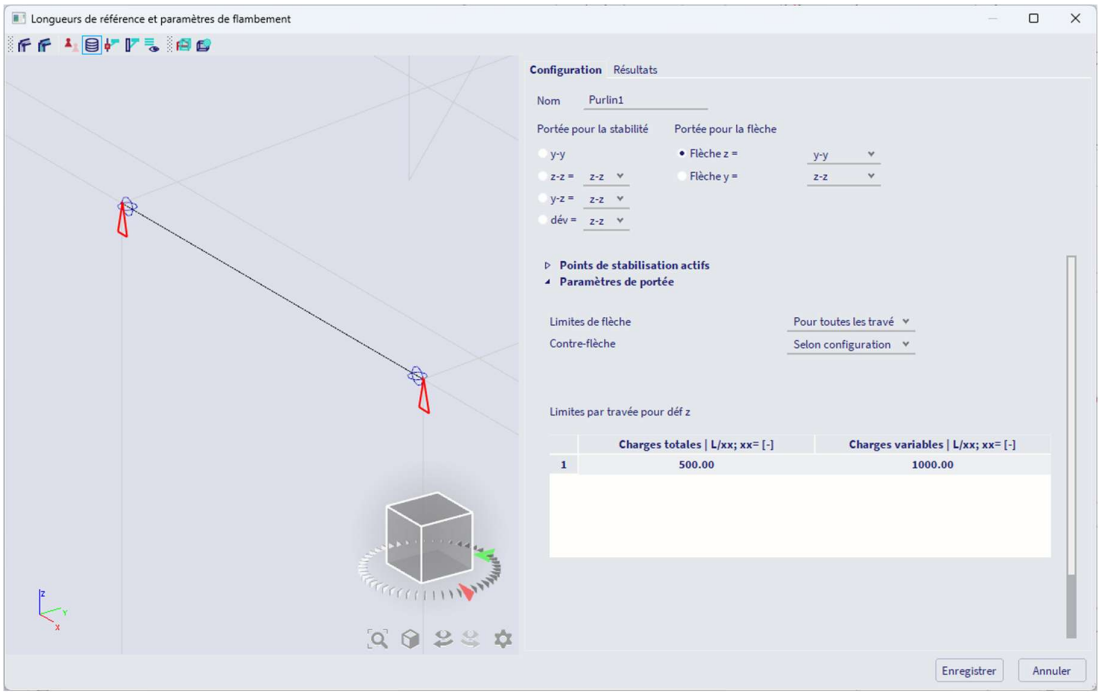
Ces limites peuvent cependant être « écrasées » par d'autres valeurs définies dans les propriétés de flambement de chaque élément individuellement :



Lors du contrôle ELS acier, les déformations relatives sont alors vérifiées avec les valeurs limites définies ci-dessus.

Exemple : Relative_deformation.esa

Sélectionner la poutre B196 et, dans les propriétés de flambement, définir une limite de 1/1000 sous charges variables et 1/500 sous charges totales, dans la direction z :



Effectuer le contrôle pour les combinaisons ELS :

Contrôle acier ELS EC-EN 1993

Calcul linéaire
Combinaison: ELS
Système de coordonnées: Principal
Extrême 1D: Global
Sélection: B196
Contrôle unité d'ensemble

Nom	dx [m]	Cas	$u_{y,max}$ [mm] $u_{z,max}$ [mm]	$u_{y,var}$ [mm] $u_{z,var}$ [mm]	Lim. $u_{y,max}$ [mm] Lim. $u_{z,max}$ [mm]	Lim. $u_{y,var}$ [mm] Lim. $u_{z,var}$ [mm]	Contrôle $u_{y,max}$ [-] Contrôle $u_{z,max}$ [-]	Contrôle $u_{y,var}$ [-] Contrôle $u_{z,var}$ [-]	Contre-flèche dx u_z [mm] Contre-flèche [mm]	Contrôle Ensemble [-]
B196	3.000	ELS/1	0.0 -3.9	0.0 -0.0	30.0 12.0	16.7 6.0	0.00 0.33	0.00 0.00	- -	**0.33**

Nom	Clé des combinaisons
ELS/1	PP + G + 0.50*Vent Y+

Calcul manuel u_z :

Limite sous charges variables : 6000mm / 1000 = 6mm
Limite sous charges totales : 6000mm / 500 = 12mm

Uz sous charges variables : 0mm
Uz sous charges totales : -3,9mm

Contrôle unité Uz sous charges variables : 0
Contrôle unité Uz sous charges variables : 3,9mm / 12mm = 0,325

Chapitre 6: CONTRÔLES ELU

Dans ce chapitre, tous les contrôles ELU selon l'EN 1993-1-3 sont expliqués en détail. Les contrôles en section comme les contrôles en stabilité se trouvent dans le poste de travail « Acier » de la roue des processus et « Contrôle ELU » (ou bien par le menu principal « Dimensionnement » / « Éléments en acier » / « Contrôles ELU »). Dans ce menu, l'utilisateur peut choisir entre la sortie brève, résumée ou détaillée :

- Avec la sortie brève, les résultats s'affichent sur une ligne.
- Avec la sortie standard ou résumée, les résultats sont résumés sur une page.
- Avec la sortie détaillée, tous les taux de travail (Contrôles Unité) sont affichés pour chaque vérification, incluant une référence aux formules de l'Eurocode 3.

Exemple : 07.WS_CFS_Hall.esa

Effectuer le contrôle acier pour la poutre B112 et regarder la note :

Contrôle ELU EC-EN 1993

Valeur: **UC ensemble**
Calcul linéaire
Combinaison: ELU
Système de coordonnées: Principal
Extrême 1D: Global
Sélection: B112

Contrôle des profilés formés à froid selon l'EN 1993-1-3
Annexe Nationale: EN standard

Élément B112	**3.000 / 6.000 m**	**Cold formed Sigma section**	**Formé à froid**	**S 235**	**ELU**	**5.16 -**

Clé des combinaisons
ELU / 1.35*SW + 1.35*SW1 + 1.50*Snow

Coeff. partiels de sécurité		
Résistance des sections	γ_{M0}	1.00
Résistance à l'instabilité	γ_{M1}	1.00
Résistance en section nette	γ_{M2}	1.25

Matériau			
Limite élastique	f_{yb}	235.0	MPa
Limite de rupture	f_u	360.0	MPa

...::CONTRÔLE EN SECTION::...

La position du contrôle critique est 3.000 m

Efforts internes		Calculé	Unité
Effort normal	N_{Ed}	3.00	kN
Effort tranchant	$V_{y,Ed}$	-0.00	kN
Effort tranchant	$V_{z,Ed}$	-0.18	kN
Torsion	T_{Ed}	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{y,Ed}$	8.20	kNm
Moment de flexion	$M_{z,Ed}$	0.79	kNm

Section efficace My+
Calcul de largeur efficace
Selon EN 1993-1-3 article 5.5.2, 5.5.3 & EN 1993-1-5 article 4.4

Id	Type	b_p [mm]	σ_1 [N/mm 2]	σ_2 [N/mm 2]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	$\lambda_{p,red}$ [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	UO	18	-185.881	-227.096								
3	I	60	-229.769	-230.496								
5	I	32	-150.224	-226.329								
7	I	28	-121.268	-148.555								
9	I	104	124.215	-119.595	-0.96	22.93	0.39		1.00	53	21	32
11	I	28	153.804	125.899	0.82	0.00	0.00		1.00	28		
13	I	32	231.594	155.489	0.67	4.76	0.27		1.00	32	15	17
15	I	60	235.000	234.274	1.00	4.01	0.54	0.52	1.00	60	30	30
17	UO	18	230.833	189.618	0.82	0.50	0.45	0.43	1.00	18		

Calcul de raidisseur
Selon EN 1993-1-3 article 5.5.3

Id	A_s [m 2]	I_s [m 4]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	h_w [mm]	k_f [-]	K [N/mm 2]	σ_{cr} [N/mm 2]	λ_d [-]	χ_d [-]	$A_{s,red}$ [m 2]
11	1.2721e-04	1.5383e-08	109	43	0	0.00	3.039	1557.754	0.39	1.00	1.2721e-04
17	9.4895e-05	3.1731e-09	53	41	232	0.00	0.549	402.949	0.76	0.92	8.7101e-05

Section efficace Mz+
Calcul de largeur efficace
Selon EN 1993-1-3 article 5.5.2, 5.5.3 & EN 1993-1-5 article 4.4

Id	Type	b_p [mm]	σ_1 [N/mm 2]	σ_2 [N/mm 2]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	$\lambda_{p,red}$ [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	UO	18	235.000	235.000	1.00	0.50	0.45	0.43	1.00	18		
3	I	60	226.136	-139.246	-0.62	15.39	0.28	0.26	1.00	37	15	22
5	I	32	-148.032	-148.032								
7	I	28	10.150	-145.324	-14.32	0.00	0.00		1.00	28		
9	I	104	12.937	12.937	1.00	4.00	0.93		0.82	85	43	43
11	I	28	10.150	-145.324	-14.32	0.00	0.00		1.00	28		
13	I	32	-148.032	-148.032								
15	I	60	226.136	-139.246	-0.62	15.39	0.28	0.26	1.00	37	15	22
17	UO	18	235.000	235.000	1.00	0.50	0.45	0.43	1.00	18		

Calcul de raidisseur
Selon EN 1993-1-3 article 5.5.3

Id	A_s [m 2]	I_s [m 4]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	h_w [mm]	k_f [-]	K [N/mm 2]	σ_{cr} [N/mm 2]	λ_d [-]	χ_d [-]	$A_{s,red}$ [m 2]
1	6.5102e-05	2.5477e-09	59	59	232	1.00	0.307	393.636	0.77	0.91	5.9332e-05
7	1.9638e-04	2.7114e-08	46	105	0	0.00	2.779	1281.125	0.43	1.00	1.9638e-04
11	1.9638e-04	2.7114e-08	105	46	0	0.00	2.779	1281.125	0.43	1.00	1.9638e-04
17	6.5102e-05	2.5477e-09	59	59	232	1.00	0.307	393.636	0.77	0.91	5.9332e-05

Propriétés effectives						
Aire effective	A_{eff}	6.9221e-04	m^2			
Moment d'inertie effectif de la section	$I_{eff,y}$	4.2621e-06	m^4	$I_{eff,z}$	2.7347e-07	m^4
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.2159e-05	m^3	$W_{eff,z}$	6.8960e-06	m^3
Décalage du centre de gravité	$e_{N,y}$	0	mm	$e_{N,z}$	-1	mm

Contrôle traction
Selon EN 1993-1-3 article 6.1.2 et formule (6.1)

Aire de la section brute	A_g	7.5398e-04	m^2
Résistance en section nette	$F_{n,Rd}$	217.15	kN
Résistance en traction	$N_{t,Rd}$	177.19	kN
Contrôle unité		0.02	-

Contrôle du moment de flexion pour M_y
Selon EN 1993-1-3 article 6.1.4 et formule (6.4)

Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.2159e-05	m^3
Résistance flexionnelle	$M_{c,y,Rd}$	9.91	kNm
Contrôle unité		0.83	-

Contrôle du moment de flexion pour M_z
Selon EN 1993-1-3 article 6.1.4 et formule (6.4)

Module de section efficace	$W_{eff,z}$	6.8960e-06	m^3
Résistance flexionnelle	$M_{c,z,Rd}$	1.62	kNm
Contrôle unité		0.48	-

Contrôle de flexion bi-axiale
Selon EN 1993-1-3 article 6.1.4 et formule (6.7)

Résistance flexionnelle	$M_{c,y,Rd}$	9.91	kNm
Résistance flexionnelle	$M_{c,z,Rd}$	1.62	kNm

Contrôle unité (6.7) = 0.83 + 0.48 = **1.31** -

Contrôle à l'effort tranchant pour V_y
Selon EN 1993-1-3 article 6.1.5 et formule (6.8)
Pas de raidisseur à l'appui.

ID élément	l_c [mm]	α [deg]	s_w [mm]	λ_w [-]	f_{bv} [MPa]	$V_{b,Rd,y,i}$ [kN]
3	63	180.00	60	0.36	136.3	16.84
15	63	0.00	60	0.36	136.3	16.84

ID élément	l_c [mm]	α [deg]	s_w [mm]	s_p [mm]	s_d [mm]	k_τ [-]	λ_w [-]	f_{bv} [MPa]	$V_{b,Rd,y,i}$ [kN]
4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14	198	90.00	195	104	225	11.57	0.90	124.9	0.00

Vérification à l'effort tranchant			
Résistance à l'effort tranchant	$V_{b,Rd,y}$	33.68	kN
Contrôle unité		0.00	-

Contrôle à l'effort tranchant pour V_z
Selon EN 1993-1-3 article 6.1.5 et formule (6.8)
Pas de raidisseur à l'appui.

ID élément	l_c [mm]	α [deg]	s_w [mm]	λ_w [-]	f_{bv} [MPa]	$V_{b,Rd,z,i}$ [kN]
3	63	180.00	60	0.36	136.3	0.00
15	63	0.00	60	0.36	136.3	0.00

ID élément	l_c [mm]	α [deg]	s_w [mm]	s_p [mm]	s_d [mm]	k_τ [-]	λ_w [-]	f_{bv} [MPa]	$V_{b,Rd,z,i}$ [kN]
4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14	198	90.00	195	104	225	11.57	0.90	124.9	48.49

Vérification à l'effort tranchant			
Résistance à l'effort tranchant	$V_{b,Rd,z}$	48.49	kN
Contrôle unité		0.00	-

Contrôle du moment de torsion
Selon EN 1993-1-3 article 6.1.6 et formule (6.11a), (6.11b), (6.11c)

Propriétés effectives			
Aire efficace de la section	A_{eff}	7.5398e-04	m^2
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.2159e-05	m^3
Module de section efficace	$W_{eff,z}$	6.8960e-06	m^3

Vérification élastique			
Indice de fibre	Fibre	90	
Contrainte directe due à N_{Ed}	$\sigma_{N,Ed}$	-4.0	MPa
Contrainte directe due à $M_{y,Ed}$	$\sigma_{My,Ed}$	190.5	MPa
Contrainte directe due à $M_{z,Ed}$	$\sigma_{Mz,Ed}$	108.9	MPa
Contrainte directe totale	$\sigma_{tot,Ed}$	295.4	MPa
Contrainte de cisaillement due à $V_{y,Ed}$	$\tau_{Vy,Ed}$	0.0	MPa
Contrainte de cisaillement due à $V_{z,Ed}$	$\tau_{Vz,Ed}$	0.1	MPa
Contrainte de cisaillement due à la torsion uniforme (St. Venant)	$\tau_{t,Ed}$	0.0	MPa
Contrainte totale de cisaillement	$\tau_{tot,Ed}$	0.1	MPa
Contrainte de von Mises	$\sigma_{von\ Mises,Ed}$	295.4	MPa
Contrôle d'unité (contrainte directe)		**1.26**	-

Contrôle unité (contrainte de cisaillement)		0.00	-
Contrôle unité (contrainte de von Mises)		**1.14**	-

Contrôle combiné en flexion composée en traction
Selon article EN 1993-1-3: 6.1.8 et formule (6.23), (6.24).

$N_{t,Rd}$	177.19	kN
$M_{cy,Rd,ten}$	10.12	kNm
$M_{cz,Rd,ten}$	2.54	kNm
$M_{cy,Rd,com}$	9.92	kNm
$M_{cz,Rd,com}$	1.62	kNm

Contrôle unité (6.23) 0.02 + 0.81 + 0.31 = **1.14** -
Contrôle unité (6.24) 0.83 + 0.48 - 0.02 = **1.29** -

L'élément ne satisfait PAS le contrôle en section !

...::CONTRÔLE DE STABILITÉ::...

Contrôle déversement
Selon article EN 1993-1-3: 6.2.4
Selon article EN 1993-1-1: 6.3.2 et formule (6.55)

Paramètres de déversement		
Méthode pour la courbe de déversement	art. 6.3.2.2	
$W_{eff,y}$	4.2159e-05	m^3
Moment critique élastique M_{cr}	2.05	kNm
Élancement relatif $\lambda_{rel,LT}$	2.20	
Élancement limite $\lambda_{rel,LT,0}$	0.20	
Courbe de déversement	b	
Imperfection α_{LT}	0.34	
Coefficient de réduction χ_{LT}	0.18	
Résistance au flambement $M_{b,Rd}$	1.75	kNm
Contrôle unité	**4.69**	-

Paramètres M_{cr}		
Longueur de déversement	6.000	m
k	1.00	
k_w	1.00	
C_1	2.51	
C_2	1.49	
C_3	0.41	
Infl. pos. des charges	déstabilisant	

Note: Paramètres C selon ECCS 119 2006 / Galea 2002

Contrôle en flexion composée avec traction
Selon article EN 1993-1-3: 6.3.

$N_{t,Rd}$	177.19	kN
$M_{b,y,Rd}$	1.75	kNm
$M_{c,z,Rd,com}$	1.62	kNm

Contrôle unité: **4.69+0.48-0.02 = 5.16** -

Cet élément ne satisfait PAS le contrôle de stabilité !

6.1. Contrôles en section

A. Traction

Le contrôle de tension est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.2.

B. Compression

Le contrôle de compression est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.3.

Le choix entre les formules (6.2) et (6.3) est fait en comparant la section brute A_g issue de la forme initiale, avec la section efficace A_{eff} issue de la forme efficace pour la compression :

- Les sections de la bibliothèque peuvent présenter des caractéristiques géométriques brutes différentes de celle de la forme initiale, car ces caractéristiques proviennent de certaines sources et sont généralement arrondies.
- Pour les sections transversales générales, la géométrie brute peut différer de la forme initiale, car cette dernière correspond à une représentation à parois minces.

C. Moment fléchissant

Le contrôle du moment fléchissant est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.4.1.

Le choix entre les formules (6.4) et (6.5) est fait en comparant le module de section élastique W_{el} issu de la forme initiale, avec le module de section efficace W_{eff} issu de la forme efficace pour la flexion :

- Les sections de la bibliothèque peuvent présenter des caractéristiques géométriques brutes différentes de celle de la forme initiale, car ces caractéristiques proviennent de certaines sources et sont généralement arrondies.
- Pour les sections transversales générales, la géométrie brute peut différer de la forme initiale, car cette dernière correspond à une représentation à parois minces.

Ce contrôle (formule (6.5)) est appliqué uniquement dans les cas suivants (EN 1993-1-3 article 6.1.4.1(2)) :

- Il n'y a qu'un moment M_y ou M_z.
- Il n'y a pas de torsion, pas de flambement torsionnel, pas de déversement et pas de flambement distortionnel.
- L'angle entre l'âme et l'aile dépasse 60).

Sinon cette formule doit être remplacée par la formule (6.6).

Les articles 6.1.4.2 et 6.1.4.3 de l'EC 1993-1-3, concernant la réserve plastique de la semelle tendue et les effets du trainage de cisaillement, ne sont pas pris en charge.

D. Effort tranchant

Le contrôle d'effort tranchant est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.5.

La résistance au cisaillement est calculée pour chaque élément « âme » séparément et la résistance de la section est pris égale à la somme de ces résistances.

La formule (6.8) est réécrite comme suit pour les deux directions :

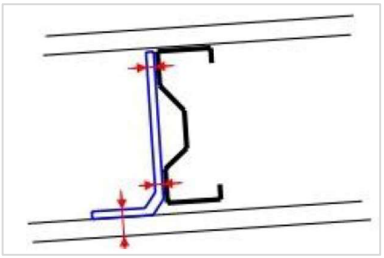
$$V_{b,Rd,y} = \sum_i V_{b,Rd,yi} = \sum_i \frac{l_{c,i} * t_i * f_{bv,i}}{\gamma_{M0}} \cos^2(\alpha_i)$$

$$V_{b,Rd,z} = \sum_i V_{b,Rd,zi} = \sum_i \frac{l_{c,i} * t_i * f_{bv,i}}{\gamma_{M0}} \sin^2(\alpha_i)$$

Avec :

- α_i : angle de l'élément i lié à l'axe principal y-y
- $l_{c,i}$: longueur de la ligne centrale d'un élément i

NB :
Différentes formules sont données pour l'âme avec et sans raidisseurs longitudinaux (cf EN 1993-1-3 formules (6.10a) et (6.10b)).
Par défaut, le contrôle en cisaillement est effectué « sans raidisseur aux appuis ».
Das le cas où des données d' »Efforts transversaux locaux » sont saisies avec l'option « Efforts transversaux locaux » non activée, le contrôle en cisaillement dans ces sections est effectué « sans raidisseurs aux appuis ».



E. Moment torsionnel

Le contrôle du moment torsionnel est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.6.

La résistance élastique moyenne f_{ya} dans les 3 formules (6.11a), (6.11b), (6.11c) sera utilisée uniquement si elle peut être utilisée pour chacune des trois composantes des efforts (N, M_y, M_z) séparément ($A_{eff} = A_g$; $W_{eff,y} = W_{el,y}$; $W_{eff,z} = W_{el,z}$).

F. Efforts transversaux locaux

Procédure générale

Le contrôle des efforts transversaux locaux est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.7. et suivants.
Le contrôle est effectué sur les positions où on observe un saut dans le diagramme d'effort de cisaillement Vz.

Remarques :

- Le diagramme de l'effort tranchant est établi à la fois pour l'élément considéré et pour les éléments adjacents. Les éléments adjacents sont définis comme les éléments appartenant au même système de flambement.
- La condition de la semelle dépend de la définition de la géométrie initiale. Dans le cas où un élément possède un type de renforcement ROU ou DEF.
- Les distances permettant de déterminer les configurations « une semelle/deux semelles » et « externe/interne » sont évaluées en tenant compte des éléments adjacents. Les éléments adjacents sont définis comme les éléments appartenant au même système de flambement.
- Lorsque la section transversale comporte plusieurs âmes, la hauteur d'âme maximale est utilisée pour déterminer la condition de chargement.
- Contrairement aux dispositions de l'article 6.1.7.2(4) de la norme EN 1993-1-3, la longueur d'appui s_s saisie est toujours utilisée telle quelle. Autrement dit, la simplification consistant à utiliser la longueur minimale pour les deux charges opposées n'est pas prise en charge.

Sections avec une seule âme non raidie

Comme indiqué dans la figure 6.6 de l'EN 1993-1-3, la résistance d'efforts transversaux locaux est prise est considérée par rapport à l'appui, et non selon l'axe principal z. Par conséquent, F_{Ed} est déterminé selon le système d'axes SCL (système de coordonnées local), et non selon le système d'axes principaux !

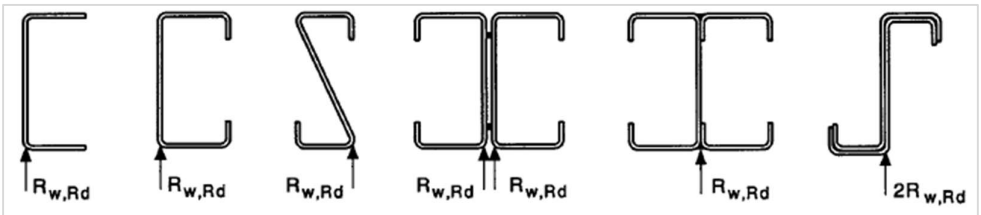


Figure 6.6 — Exemples de sections transversales comportant une seule âme

Ce paragraphe décrit la procédure générale permettant de déterminer la résistance locale de l'âme transversale. Cette procédure s'applique à tous les types de sections, à l'exception de la FC 115 (profilé oméga formé à froid).

Étape 1

Dans un premier temps, la hauteur de l'âme (h_w) est déterminée pour chaque élément « âme » :

- Seuls les éléments de type I sont pris en compte. Les éléments présentant les types de raidisseurs RUO et DEF ne sont pas pris en compte.
- Pour chacun de ces éléments i, la longueur de la ligne moyenne $l_{c,i}$ est extraite de la forme initiale.
- Pour chacun de ces éléments i, l'angle ϕ_i est déterminé par rapport à l'axe horizontal (sur la base de la Figure 6.6). Seuls les éléments présentant un angle de 45° sont pris en compte.
- La hauteur de l'âme de chaque élément i est calculée comme suit :

$$h_{w,i} = l_{c,i} * \sin\phi_i$$

Si aucun des éléments de la section ne satisfait aux conditions ci-dessus, la vérification des efforts transversaux locaux n'est pas prise en charge pour cette section.

Étape 2

Une fois que h_{wi} est déterminée, la résistance locale transversale $R_{w,Rd,i}$ est calculée pour chacun des éléments concernés, conformément à l'EN 1993-1-3, article 6.1.7.2, tableau 6.7. Les coefficients k_1 à k_5 sont déterminés conformément à l'article 6.1.7.2(3) de l'EN 1993-1-3.

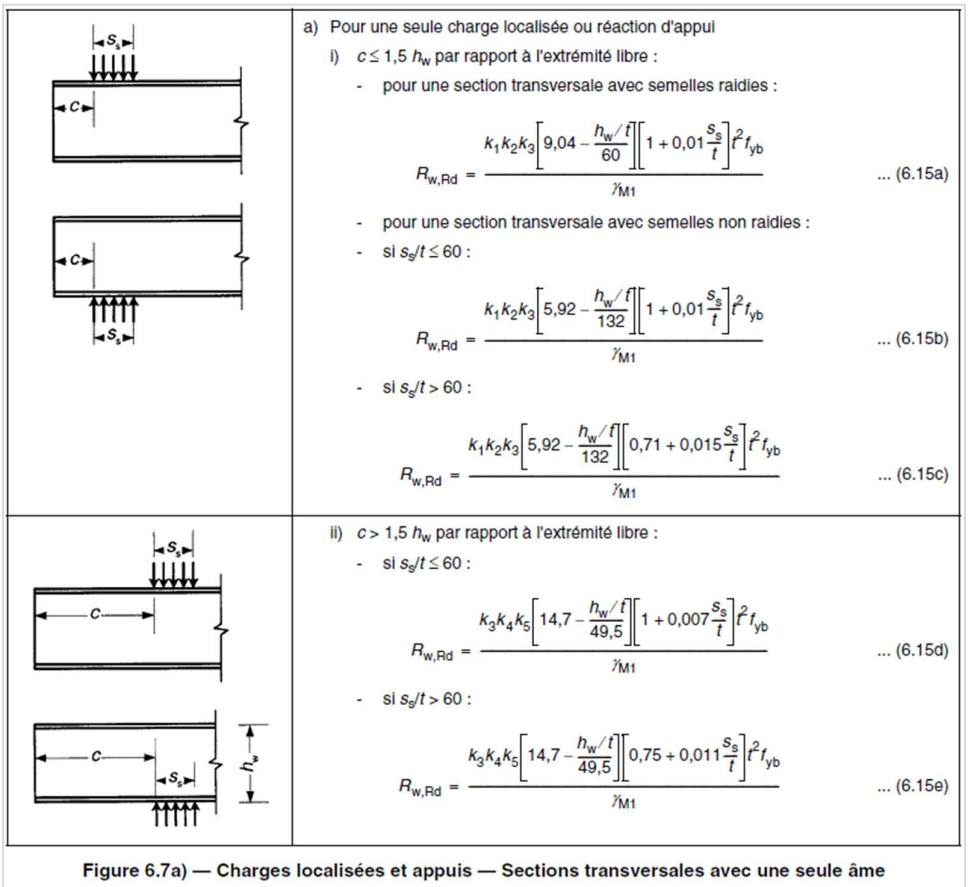


Figure 6.7a) — Charges localisées et appuis — Sections transversales avec une seule âme

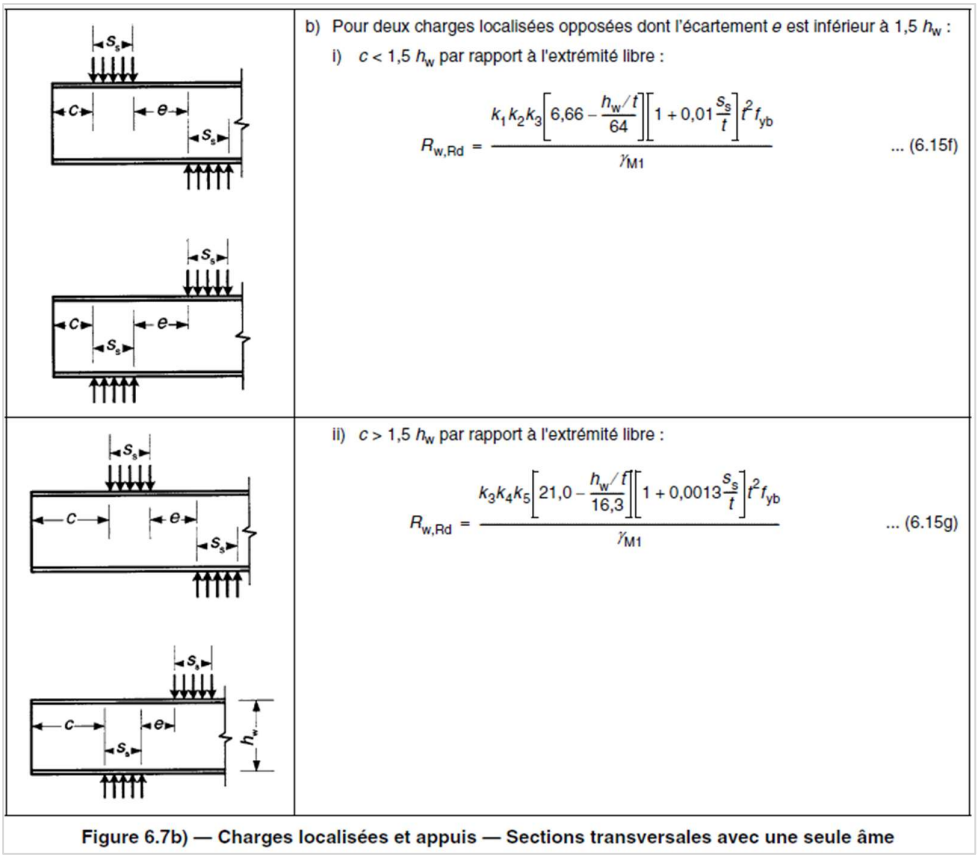
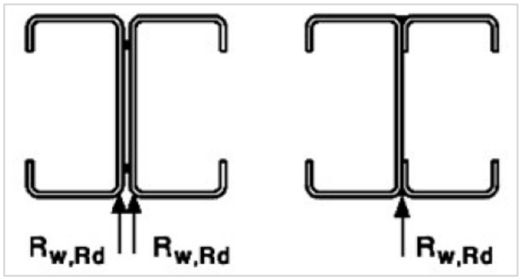


Figure 6.7b) — Charges localisées et appuis — Sections transversales avec une seule âme

La résistance finale de la section est obtenue en additionnant les résistances individuelles de chaque élément.

Dans le cas où l'option « Rotation de l'âme empêchée » est définie à l'aide des données relatives aux efforts transversaux locaux, plutôt qu'à partir des Figures 6.7a et 6.7b de l'EN 1993-1-3, les formules données à l'article 6.1.7.2(4) de cette norme sont utilisées.

Exemple de rotation de l'âme empêchée :



Sections Omega

Pour les sections de type FC 115 (profilé oméga formé à froid) uniquement, la procédure spécifique aux sections comportant deux âmes non raidies ou plus est appliquée. La résistance locale de l'âme aux efforts transversaux $R_{w,Rd,i}$ est déterminée pour chacune de ces âmes conformément à l'article 6.1.7.3 de l'EN 1993-1-3.

Les autres sections comportant deux âmes non raidies ou plus sont systématiquement calculées selon la procédure générale, et non selon cette procédure spécifique.

Âmes raidies

Ce paragraphe décrit la procédure spécifique applicable aux âmes raidies, conformément à l'article 6.1.7.4 de l'EN 1993-1-3.
Cette méthode est utilisée uniquement lorsqu'un ou plusieurs éléments présentent le type de raidisseur RI.

La procédure comprend quatre étapes, comme indiqué ci-dessous.

Étape 1 : créer des âmes « composées »
Dans un premier temps, les âmes « composées » sont créées en utilisant la même procédure comme indiqué dans « Sections avec raidisseurs internes ».
Cela inclut notamment la détermination de la longueur de la ligne moyenne $l_{c,i}$ de ces âmes « composées ».

Étape 2 : évaluer des âmes « composées »
La procédure spécifique décrite à l'article 6.1.7.4 de l'EN 1993-1-3 n'est applicable que sous certaines conditions. Chaque âme « composé » est évalué pour voir si elle rencontre les exigences suivantes :

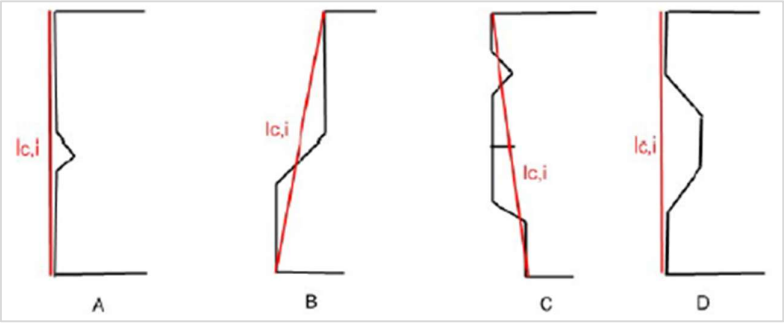
- Un ou plusieurs éléments doivent présenter le type de raidisseur RI.

- Chaque élément RI doit être de type I, c'est-à-dire être relié à d'autres éléments de part et d'autre, ce qui signifie qu'il s'agit d'un pli et non d'un raidisseur.

- Les éléments reliés à cet élément RI ne doivent pas présenter eux-mêmes le type de raidisseur RI. Cela signifie que la procédure ne s'applique pas en présence d'éléments raidis adjacents, c'est-à-dire d'éléments formant des âmes composées.

Les âmes composées qui **ne satisfont pas** à ces exigences sont ensuite évaluées à l'étape 3.
Les âmes composées qui **satisfont à l'ensemble** de ces exigences sont ensuite évaluées à l'étape 4.

Exemples de sections transversales comportant des âmes composées :



- La section A contient deux raidisseurs RI qui sont connectés. L'âme ne remplit alors pas les exigences (calculé comme décrit dans l'étape 3).

- La section B contient un raidisseur RI simple qui remplit les exigences. Ce raidisseur est ainsi un véritable raidisseur à deux plis, la disposition spécifique de la norme s'applique donc.

- La section C contient plusieurs raidisseurs RI, cependant ils ne répondent pas tous aux exigences (l'un est un raidisseur en console, tandis que les autres sont reliés, etc.). L'âme ne satisfait donc pas aux exigences (calculées comme décrit à l'étape 3).

- La section D possède une âme composée qui contient deux raidisseurs RI. Tous deux satisfont à l'ensemble des exigences et constituent donc de véritables raidisseurs doubles (calculées comme décrit à l'étape 4).

Étape 3 : les âmes « composées » NE satisfont PAS les exigences
Pour les âmes composées qui ne satisfont pas les exigences, la procédure spéciale n'est pas valide.
La résistance d'effort transversal local de ces âmes sera déterminée selon la procédure pour les sections ayant une âme seule non raidie.

Dans ce cas, la longueur de la ligne médiane $l_{c,i}$ de l'âme composée est utilisée dans la détermination de h_w.

L'angle ϕ_i est pris égal à l'angle entre la ligne centrale et l'axe horizontal.

Étape 4 : les âmes « composées » satisfont les exigences
Pour les âmes composées qui satisfont les exigences, la procédure spéciale décrit dans l'article 6.1.7.4 de l'EN 1993-1-3 peut s'appliquer.

La « ligne système » de cette âme est prise égale à la longueur de la ligne médiane $l_{c,i}$.

L'excentricité e est calculée à chaque extrémité d'un RI de l'âme « composée ». Les excentricités e_{min} et e_{max} sont alors considérées comme les valeurs min et max pour l'âme composée considérée.

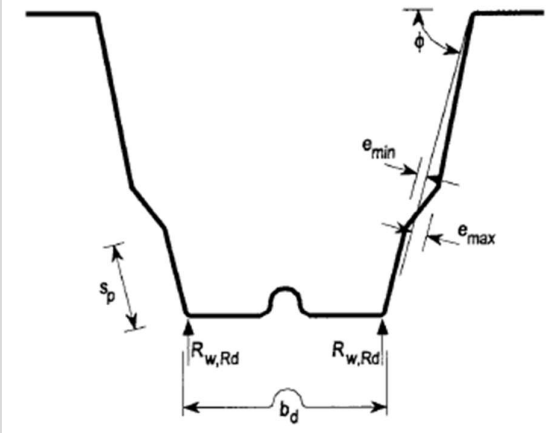


Figure 6.10 — Ames raidies

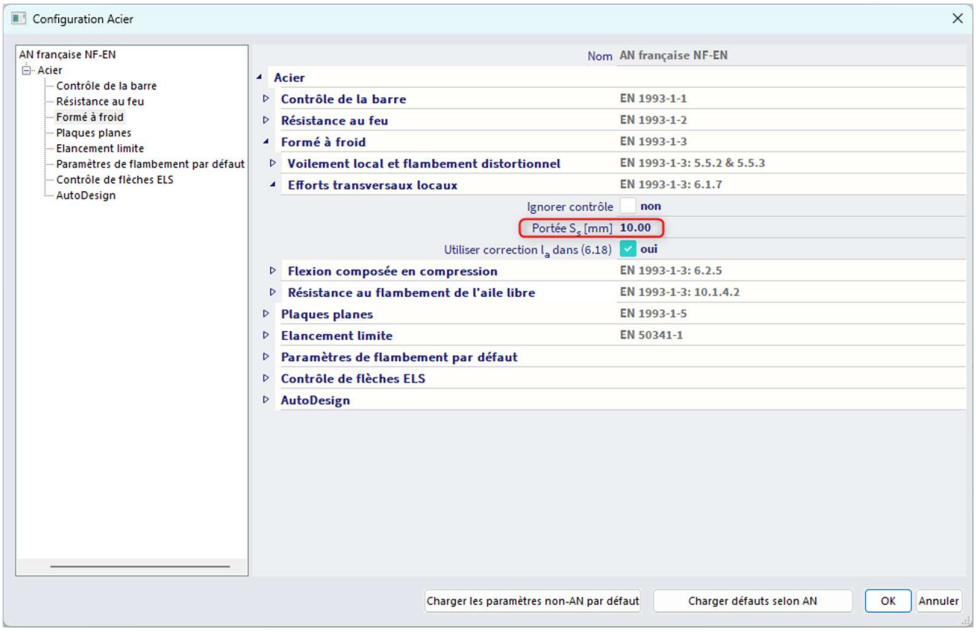
L'article est appliqué si la condition ci-dessous est remplie :

$$2 < \frac{e_{max}}{t} < 12$$

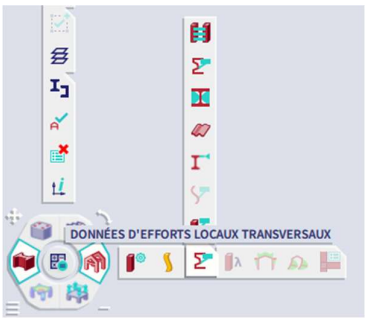
Dans le cas où cette condition n'est pas remplie, l'article spécial n'est pas appliqué et l'âme composée est considérée comme une âme qui ne remplit pas tous les prérequis. Pour une tel cas, la procédure décrit dans l'étape 3 est donc appliqué.

Efforts transversaux locaux dans SCIA Engineer

Dans SCIA Engineer, un effort ponctuel est saisi sous la forme d'un point. Cependant, lors du calcul de la vérification de l'effort transversal local, une longueur d'appui S_s est prise en compte.
Par défaut, cette valeur est définie à 10mm dans SCIA Engineer. Elle peut être modifiée dans la « Configuration acier », accessible depuis le poste de travail « Acier ».



Il est possible de modifier cette longueur d'appui pour une seule poutre, ou de modifier manuellement les propriétés par défaut de cette poutre, à l'aide de l'option « Données sur les efforts transversales locales », accessible via le poste de travail « Acier ».



Exemple : 08.WS_CFS_Hall 2.esa

Considérons la poutre B122 et regardons la sortie détaillée pour les combinaisons ELU :

Contrôle des efforts transversaux locaux
Selon article EN 1993-1-3: 6.1.7.2, 6.1.7.4 et formule (6.15d)

Paramètres de forces locales transversales		
Condition de semelle	Raidie	
Condition de chargement	Une aile interne (IOF)	
Rotation de l'âme	Non empêchée	
Rayon de courbure intérieur r	4	mm
Portée s_s	10	mm
k	1.03	
k_1	0.99	
k_4	0.99	

Elément	l_c [mm]	φ [deg]	h_w [mm]	t [mm]	k_2	k_3	k_5	$R_{w,Rd,i}$ [kN]
4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14	198	90.00	198	2	0.84	1.00	0.94	11.02

Elément	e_{min} [mm]	e_{max} [mm]	b_d [mm]	s_p [mm]	$\kappa_{a,s}$
4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14	0	27	63	32	11.02

Note: L'âme raidie formée des éléments 4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14 ne remplit pas la condition de la formule (6.21).
Par conséquent l'article 6.1.7.4 n'est pas appliqué.

Vérification des forces locales transversales		
Charge/Réaction F_{Ed}	35.00	kN
$R_{w,Rd}$	11.02	kN
Contrôle unité	**3.18**	-

G. Traction et flexion combinées

Le contrôle de la combinaison de la traction et de la flexion est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.8.

H. Compression et flexion combinées

Le contrôle de la combinaison de la compression et de la flexion est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.9.

Les moments supplémentaires dus au décalage de l'axe neutre sont calculés au début de la vérification, puis ajoutés aux efforts internes. Cela garantit que les vérifications spécifiques en flexion sont également effectuées lorsqu'il n'y a aucun moment initial, mais uniquement un moment supplémentaire.

I. Effort tranchant, effort normal et moment fléchissant combinés

Le contrôle de la combinaison de l'effort tranchant, de l'effort normal et du moment fléchissant est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.10.

Les formules (6.27) sont réécrites comme suit pour les deux directions :

- Cisaillement V_y

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Ed}}{M_{z,pl,Rd}}\right)\left(\frac{2V_{y,Ed}}{V_{y,b,Ed}} - 1\right)^2 \leq 1$$

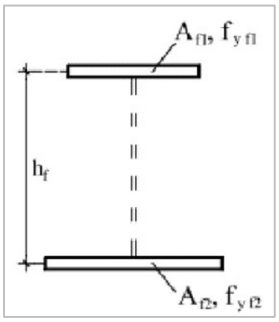
- Cisaillement V_z

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Ed}}{M_{y,pl,Rd}}\right)\left(\frac{2V_{z,Ed}}{V_{z,b,Ed}} - 1\right)^2 \leq 1$$

$M_{f,Ed}$ est la résistance de moment de calcul de la section, constitué uniquement de l'aire efficace des semelles.

$M_{f,Ed}$ est pris égal à 0 dans le cas de V_y. En cas de flexion suivant l'axe faible, l'âme joue le rôle d'une semelle.
Comme il n'y a alors qu'une seule semelle, son moment résistant est négligeable. De plus, dans le cas de sections comportant plusieurs âmes, comme les sections en caisson, l'article 7.1(5) de la norme EN 1993-1-5 spécifie que cette valeur est égale à zéro. Par approche générale et conservative pour V_y, la valeur de $M_{f,Ed}$ est prise égale à zéro.

NB : Selon la [Ref.2], $M_{f,Ed}$ est calculé comme suit :



$$M_{f,Ed} = \min\left(h_f . A_1 . \frac{f_{y,f1}}{\gamma_{M0}} ; h_f . A_2 . \frac{f_{y,f2}}{\gamma_{M0}}\right)$$

Cela est généralisé de la manière suivante :

- Seuls les éléments de type I, UO et SO sont pris en compte.

- Seuls les éléments formant un angle de 45° avec l'axe principal yy sont considérés.
  S'il n'existe aucun élément de ce type, ou s'il n'y en a qu'un seul, alors : **$M_{f,Ed} = 0$**.

- Parmi ces éléments, celui présentant la plus petite valeur de b_{eff} est retenu. La largeur b_{eff} correspond à la largeur efficace de cet élément, déterminée à partir de la section efficace en flexion.

- **$A_f = b_{eff} * t$** avec t l'épaisseur de l'élément considéré.

- Seuls les éléments formant un angle strictement supérieur à 45° avec l'axe principal yy sont pris en compte. S'il n'existe aucun élément de ce type, alors : **$M_{f,Ed} = 0$**.

- Parmi ces éléments, celui présentant la plus grande valeur de **l_c * sin(α)** est retenu, où l_c est la longueur de la ligne médiane de l'élément.

- **$h_f = l_c$ * sin(α)**

- $M_{f,Ed}$ est désormais calculé comment suit :

$$M_{f,Ed} = h_f . A_f . \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

J. Moment fléchissant et charge locale ou réaction d'appui combinés

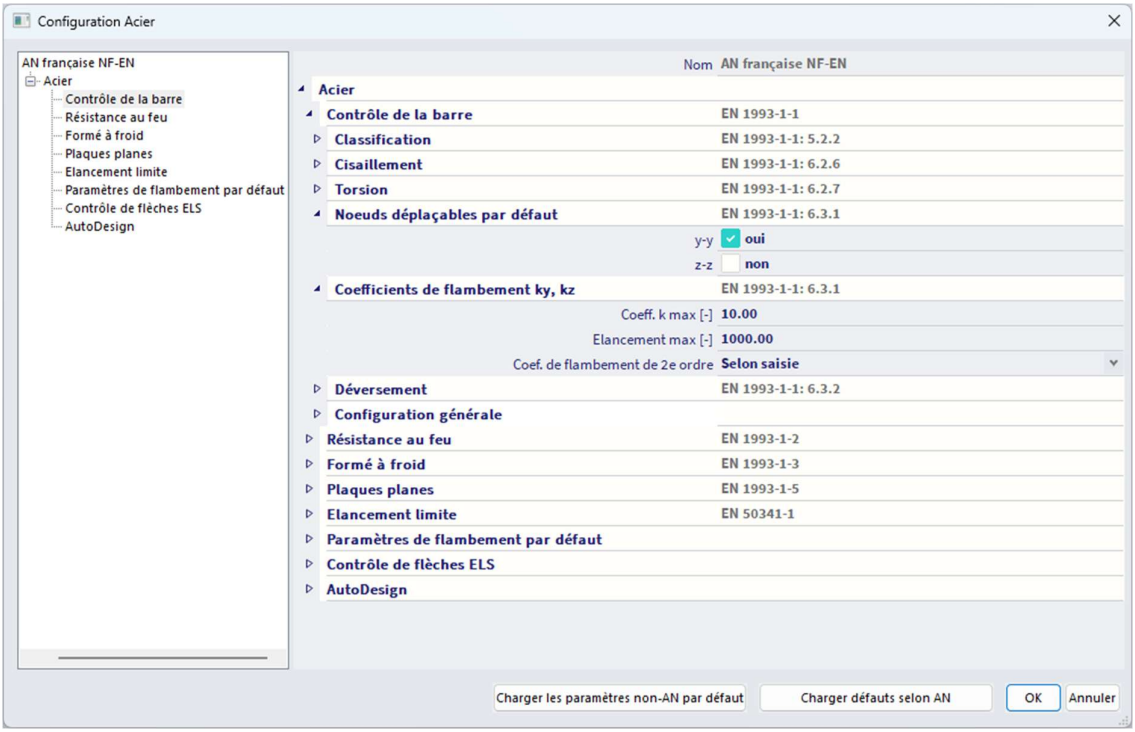
Le contrôle de la combinaison du moment fléchissant et de la charge locale ou de la réaction d'appui est effectué selon l'EN 1993-1-3, art. 6.1.11.

Dans la formule (6.28c), l'effort interne M_{Ed} correspond au moment fléchissant réel dans la section considérée, et non au moment fléchissant au droit du bord de l'appui.

6.2. Contrôles en stabilité

A. Remarques générales

Les différentes longueurs systèmes et types de déplacements doivent être définis. La valeur par défaut peuvent être écrasées par l'utilisateur dans l'option « Longueur de référence et paramètres de flambement » d'un élément. Le paramétrage par défaut est défini dans la « Configuration acier » :



Mais il est recommandé de vérifier pour chaque élément si ce paramétrage par défaut est correct.

B. Ratio de flambement

Méthode générale

Pour le calcul des coefficients de flambement, des formules approximatives sont utilisées. Ces formules sont traitées dans la partie théorique de l'aide en ligne (Ref.[32]).

Les formules suivantes sont utilisées pour les coefficients de flambement :

- Pour une structure à nœuds non déplaçables

$$\frac{l}{L} = \frac{(\rho_1\rho_2 + 5\rho_1 + 24).(\rho_1\rho_2 + 4\rho_1 + 4\rho_2 + 12).2}{(2\rho_1\rho_2 + 11\rho_1 + 5\rho_2 + 24).(2\rho_1\rho_2 + 5\rho_1 + 11\rho_2 + 24)}$$

- Pour une structure à nœuds déplaçables

$$\frac{l}{L} = \sqrt[x]{\frac{\pi^2}{\rho_1 x} + 4}$$

Avec :

L	la longueur système
E	le module d'Young
I	le moment d'inertie
C_i	la rigidité au nœud i
M_i	le moment au nœud i
F_i	le moment au nœud i

Et :

$$x = \frac{4\rho_1\rho_2 + \pi^2\rho_1}{\pi^2(\rho_1 + \rho_2) + 8\rho_1\rho_2}$$

$$\rho_i = \frac{C_i L}{EI}$$

$$C_i = \frac{M_i}{\phi_i}$$

Les valeurs pour M_i et ϕ_i sont approximativement déterminés par les efforts internes et les déplacements, calculées par des cas de charges qui génèrent des formes de déformation, formes similaires aux formes de flambement.

Les cas de charges suivants sont pris en compte :

- Cas de charges 1 :

  Sur les poutres, sont utilisées les charges réparties locales :

  q_y = 1N/m et q_z = -100N/m

  Sur les poteaux, sont utilisées les charges réparties globales :

  Q_x = 10000N/m et Q_y = 10000N/m

- Cas de charges 2 :

  Sur les poutres, sont utilisées les charges réparties locales :

  q_y = -1N/m et q_z = -100N/m

  Sur les poteaux, sont utilisées les charges réparties globales :

  Q_x = -10000N/m et Q_y = -10000N/m

L'approche utilisée donne de bons résultats pour des structures à portiques avec attaches perpendiculaires rigides ou semi-rigides. Pour les autres cas, l'utilisateur doit évaluer les ratios de flambement.

Exemple : WS CFS 03.esa

Regardons l'élément poteau B1.

- L = 4000mm
- Défini comme « à nœuds déplaçables »
- E = 210 000N/mm²
- I_y = 22 340 000mm⁴

Résultats au nœud N1 :

- f_{iy} = 32,3484rad
- M_y = 64768,2*10⁶ Nmm
- C_i = 1,999.10⁹ Nmm/rad

Résultats au nœud N2 pour LC1 :

- f_{iy} = 42,1384rad
- M_y = 15469,39*10⁶ Nmm
- C_i = 3,58.10⁸ Nmm/rad

Valeurs calculées pour le flambement :

- ⇨ $\rho_1 = 1{,}71$
- ⇨ $\rho_2 = 0{,}36$
- ⇨ x = 0,79
- ⇨ coefficient de flambement = 2,65

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{3{,}14^2 * 210000 * 22340000}{(2{,}65 * 4000)^2} = 411{,}12\text{kN}$$

Dans SCIA Engineer :

Paramètres de flambement		yy	zz	
Noeuds déplaçables		déplaçable	non-déplaçable	
Longueur système	L	4.000	4.000	m
Coefficient de flambement	k	2.65	1.00	
Longueur de flambement	l_{cr}	10.616	4.000	m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	410.81	957.29	kN
Élancement	λ	150.34	98.49	
Elancement relatif	λ_{rel}	1.60	1.05	
Elancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.20	0.20	

k_{yy} = 2,65

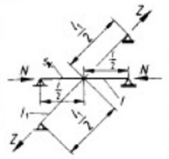
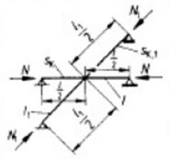
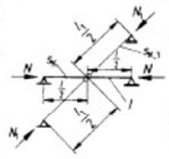
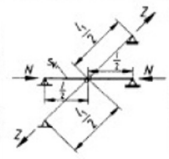
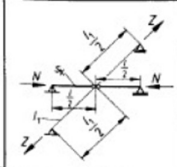
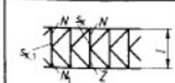
Dans le cas LC3, il y a une charge simple de 1kN.
Via une analyse en stabilité, il est possible de vérifier l'alpha critique et ainsi la charge de flambement critique :

Multiplicateurs de charge critiques

Nom de la combinaison	N -	f
S1	1	425.83

Diagonales en croix

Lorsque l'option « Diagonales en croix » est sélectionnée, la longueur de flambement perpendiculaire au plan diagonal, est calculée selon la norme DIN 18800 Teil 2, tableau 15. Cela signifie que la longueur de flambement s_k est fonction de la répartition de la charge dans l'élément, et ce n'est pas une donnée purement géométrique.

	1	2	3
1		$s_K = l \sqrt{\frac{1 - \frac{3}{4}\frac{Z \cdot l}{N \cdot l_1}}{1 + \frac{I_1 \cdot l^3}{I \cdot l_1^3}}}$ jedoch $s_K \geq 0{,}5\ l$	
2		$s_K = l \sqrt{\frac{1 + \frac{N_1 \cdot l}{N \cdot l_1}}{1 + \frac{I_1 \cdot l^3}{I \cdot l_1^3}}}$ jedoch $s_K \geq 0{,}5\ l$	$s_{K,1} = l_1 \sqrt{\frac{1 + \frac{N \cdot l_1}{N_1 \cdot l}}{1 + \frac{I \cdot l_1^3}{I_1 \cdot l^3}}}$ jedoch $s_{K,1} \geq 0{,}5\ l_1$
3		durchlaufender Druckstab $s_K = l \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{12} \cdot \frac{N_1 \cdot l}{N \cdot l_1}}$	gelenkig angeschlossener Druckstab $s_{K,1} = 0{,}5\ l_1$ wenn $(E \cdot I)_d \geq \frac{N_1 \cdot l^3}{\pi^2 \cdot l_1} \left(\frac{\pi^2}{12} + \frac{N \cdot l_1}{N_1 \cdot l}\right)$
4		$s_K = l \sqrt{1 - 0{,}75 \frac{Z \cdot l}{N \cdot l_1}}$ jedoch $s_K \geq 0{,}5\ l$	
5		$s_K = 0{,}5\ l$ wenn $\frac{N \cdot l_1}{Z \cdot l} \leq 1$ oder wenn gilt $(E \cdot I_1)_d \geq \frac{3\,Z \cdot l_1^2}{4\,\pi^2} \left(\frac{N \cdot l_1}{Z \cdot l} - 1\right)$	
6		$s_K = l \left(0{,}75 - 0{,}25 \left\lvert\frac{Z}{N}\right\rvert\right)$ jedoch $s_K \geq 0{,}5\ l$	$s_{K,1} = l \left(0{,}75 + 0{,}25 \frac{N_1}{N}\right)$ $N_1 < N$

Avec :

s_k	longueur de flambement
l	longueur d'élément
l_1	longueur de diagonale
I	moment d'inertie (dans le plan de flambement) de l'élément
I_1	moment d'inertie (dans le plan de flambement) de la diagonale
N	effort de compression dans l'élément
N_1	effort de compression dans la diagonale
Z	effort de traction dans la diagonale
E	module d'élasticité

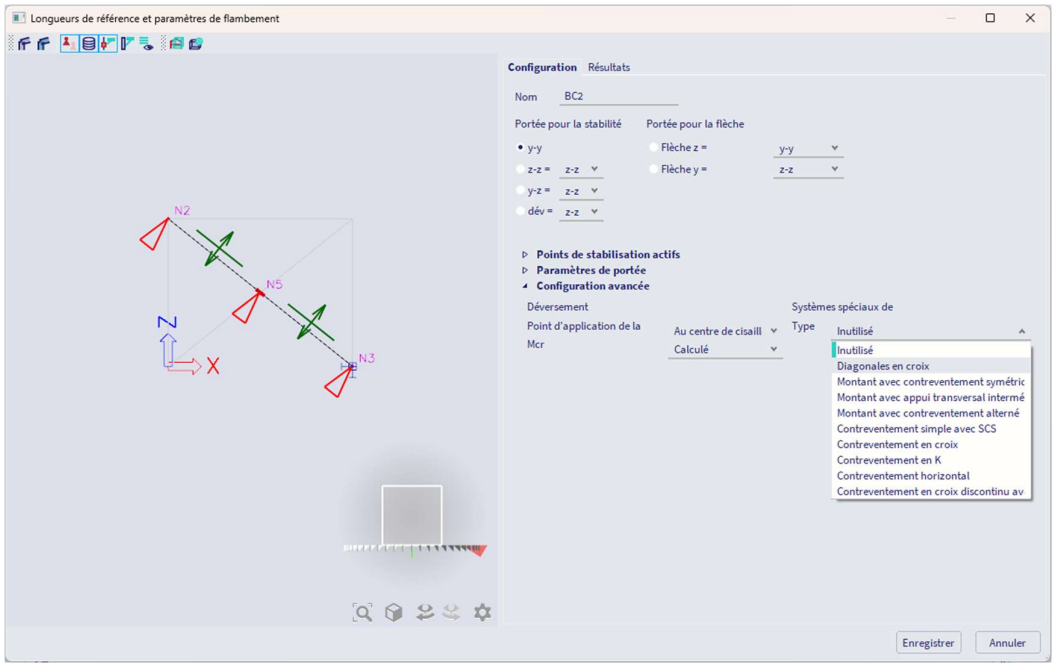
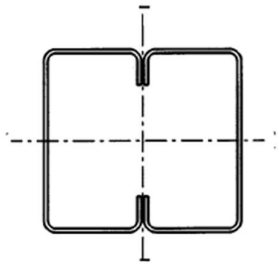
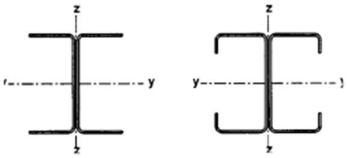
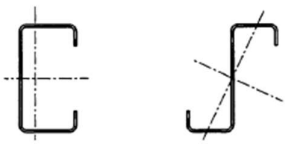
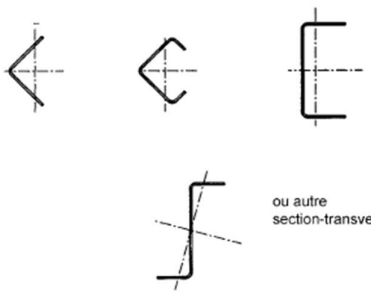


Tableau 6.3 — Courbe de flambement appropriée pour divers types de section transversale

Type de section transversale		Flambement par rapport à l'axe	Courbe de flambement
	Si f_{yb} est utilisée	quelconque	b
	si f_{ya} est utilisée *)	quelconque	c
		y – y z – z	a b
		quelconque	b
 ou autre section-transversale		quelconque	c

*) Il convient de n'utiliser la limite d'élasticité moyenne f_{ya} que si $A_{eff} = A_g$.

Cela a été implémenté dans SCIA Engineer comme suit :

Code forme	Description	Selon l'axe	Courbe
1	Section en I	y-y z-z	a b
101	Section en I asymétrique	y-y z-z	a b
114	Section en C formée à froid	tous	b
116	Section en C formée à froid - Poutre à l'égout	tous	b
117	Section en C formée à froid - Rive	tous	b
118	Section en ZED formée à froid	tous	b
119	Section en ZED formée à froid Section à ailes asymétriques	tous	b
120	Section en ZED formée à froid Section à aile inclinée	tous	b
121	Section en sigma formée à froid	tous	b
122	Section raidie en sigma formée à froid	tous	b
123	Section en sigma formée à froid - Rive	tous	b
124	Section en sigma formée à froid - Poutre à l'égout	tous	b
125	Section en sigma formée à froid Poutre de rive à l'égout	tous	b
126	Section en ZED formée à froid Section aux deux ailes inclinées	tous	b
	2CFCo avec a = 0	y-y z-z	a b
	2CFCc avec a = 0	Règles des sections creuses (6.2.2(3))	
	2CFUo avec a = 0	y-y z-z	a b
	2CFUc avec a = 0	Règles des sections creuses (6.2.2(3))	
	2CFLT avec a = 0	tous	c
	Toute autre section	tous	c

Toutes les autres sections tombent dans le cas « autres sections » de courbe c pour tous les axes.

C. Flambement torsionnel (-flexionnel)

Le contrôle de flambement flexionnel est effectué selon l'EN 1993-1-3, article 6.2.3, et l'EN 1993-1-1, article 6.3.1.4.
La courbe de flambement torsionnel (-flexionnel) est prise égale à celle de la courbe de flambement zz selon le tableau donné dans les longueurs de flambement flexionnel.
La valeur de l'effort élastique critique N_{cr} est prise égale à la plus petite valeur de $N_{cr,T}$ (flambement torsionnel) et $N_{cr,TF}$ (flambement torsionnel flexionnel).

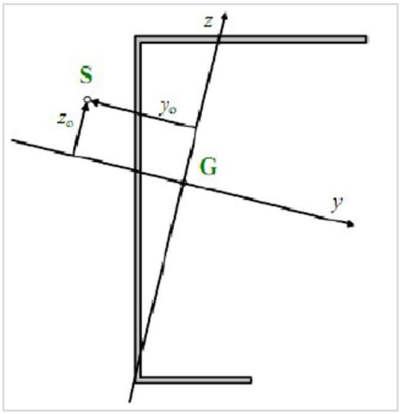
Calcul de $N_{cr,T}$

La résistance de calcul au flambement $N_{b,Rd}$ pour le flambement torsionnel ou torsionne-flexionnel (selon l'EC3) devrait être obtenue en utilisant la courbe de flambement b, et avec un élancement relatif donné par :

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(G.I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{l_T^2} \right)$$

Avec :

- E Module d'Young
- G Module de cisaillement
- I_t Constante de torsion
- I_w Constante de gauchissement
- I_T Longueur de flambement pour le mode de flambement torsionnel
- y_0 et z_0 Coordonnées du centre de cisaillement par rapport au centre de gravité
- i_y Rayon de giration selon l'axe fort
- i_z Rayon de giration selon l'axe faible



Calcul de $N_{cr,TF}$

La charge critique élastique $N_{cr,TF}$ pour le flambement torsionnel est calculée selon la Réf.[3].
$N_{cr,TF}$ est pris égal à la plus petite racine de l'équation cubique suivante en N :

$$i_0^2 (N - N_{cr,y})(N - N_{cr,z})(N - N_{cr,T}) - N^2 y_0^2 (N - N_{cr,z}) - N^2 z_0^2 (N - N_{cr,y}) = 0$$

Avec :

- $N_{cr,y}$ charge normale critique pour le flambement flexionnel autour de l'axe yy
- $N_{cr,z}$ charge normale critique pour le flambement flexionnel autour de l'axe zz
- $N_{cr,T}$ charge normale critique pour le flambement torsionnel

D. Déversement

Le contrôle au déversement est effectué selon l'EN 1993-1-3, article 6.2.4, et l'EN 1993-1-1, article 6.3.2.2.

Pour les sections I (symétrique et asymétrique), et les sections creuses rectangulaires (RHS), le moment critique élastique pour le déversement M_{cr} est calculé par la formule suivante :

$$M_{cr} = C_1 . \frac{\pi^2 E I_z}{(k_{LT}.L)^2} . \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_{LT}.L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (c_g z_g - c_3 z_j)^2} - [c_g z_g - c_3 z_j] \right\}$$

Avec :

- E Module d'Young / d'élasticité (E = 210000N/mm² pour l'acier)
- G Module de cisaillement (G = 80770N/mm² pour l'acier)
- $K_{LT}.L$ Longueur de déversement de la poutre entre les points qui ont des maintiens (= l_{LTB})
- I_t Constante de torsion
- I_w Constante de gauchissement
- I_z Moment d'inertie selon l'axe faible
- z_g Distance entre le point d'application de la charge et le centre de cisaillement
- k_w Coefficient qui réfère au gauchissement en extrémités.

  A moins d'une disposition spécifique ne soit prise pour les maintiens, $k_w = 1$.

- z_j Pour les sections doublement symétriques : $z_j = 0$

$$z_j = z_s - 0{,}5 . \int_A (y^2 + z^2) \frac{z}{I_y} dA$$

- z_s Coordonnée du centre de cisaillement

Les coefficients C_1, C_2 et C_3 dépendent du chargement et des conditions de maintien aux extrémités.

Dans SCIA Engineer, différentes méthodes sont implémentées pour le calcul de ces coefficients C_1 et C_2 (cf ci-après).

Les sections à jarret (I+Ivar, Iw+Pivar, Iw+Iwvar, Iw+Ivar) et les sections de rails composés (Iw+rail, Iwn+rail, I+rail, I+2PL+rail, I+PL+rail, I+2L+rail, I+Ud+rail) sont considérés comme des sections en I asymétriques équivalentes.

La formule pour M_{cr} utilise les paramètres suivants :

- C_1, C_2, C_3 : calculés selon l'ENV, l'ECCS ou Lopez
- Longueur de déversement : k_{LT} * L
- k et k_w : coefficients liés au maintiens d'extrémité
- z_g : position de la charge
- z_j : asymétrie de la section

Comment sont calculés les coefficients C_1, C_2 et C_3 ?

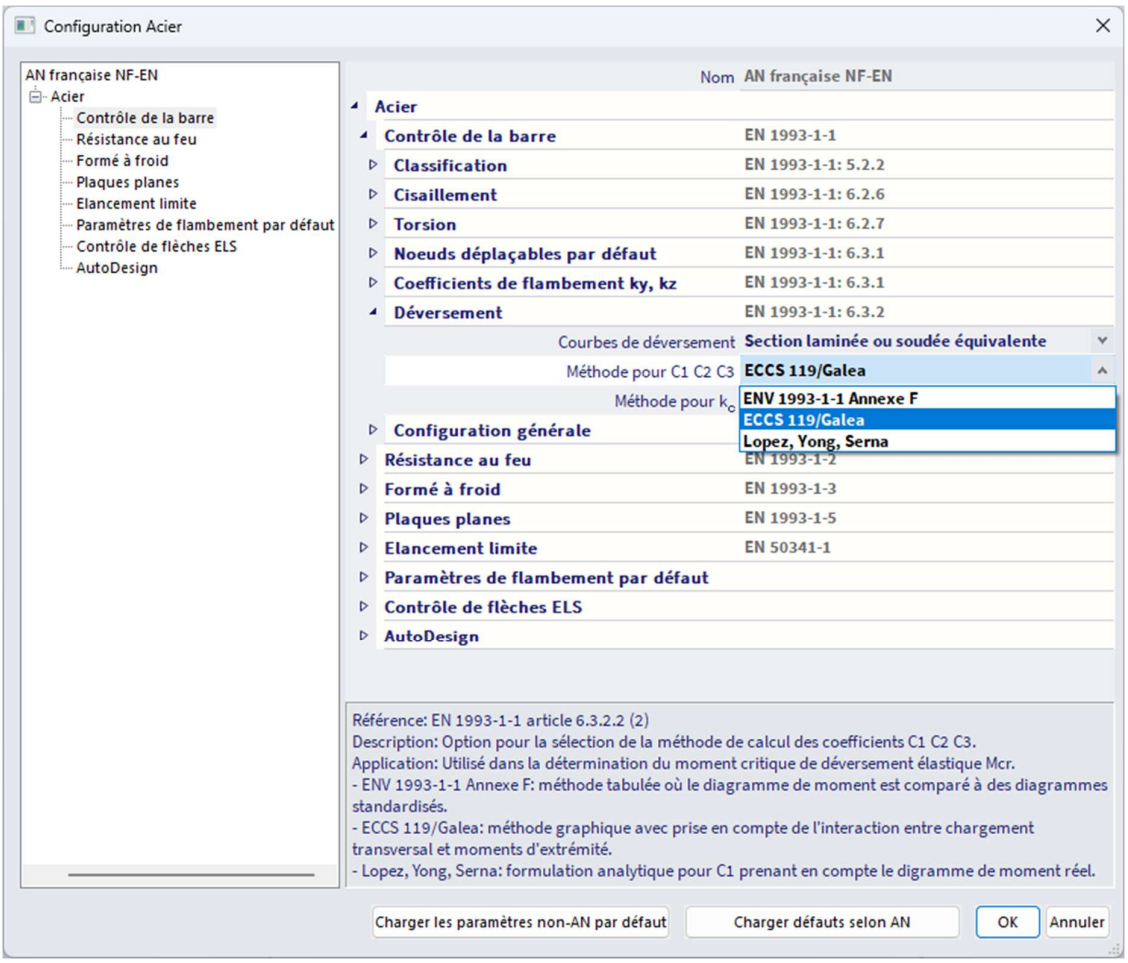
C_1 : prise en compte de la forme du diagramme de moment
C_2 : prise en compte de la position du chargement
C_3 : prise en compte de l'asymétrie de la section

Les coefficients C_1, C_2 et C_3 peuvent être calculés dans SCIA Engineer selon 3 méthodes différentes :

- ENV 1993-1-1 annexe F
- ECCS 119/Galea
- Lopez, Young, Serna

La méthode appliquée par défaut dans SCIA Engineer est l'ECCS 119/Galea (cf ci-après).

L'utilisateur peut choisir entre ces 3 méthodes dans la « Configuration acier », accessible depuis le poste de travail « Acier » de la roue des processus :



ENV 1993-1-1 Annexe F

Lorsque ce paramètre est sélectionné, les coefficients de moment sont déterminés conformément à l'annexe F de la norme ENV 1993-1-1, réf. [5].

Pour déterminer les coefficients de moment (EN 1993-1-1 : C_1, C_2 et C_3) dans le cadre du déversement (LTB), nous utilisons les tableaux normatifs.
La répartition actuelle des moments est comparée à plusieurs répartitions de moments types. Ces répartitions types correspondent aux diagrammes de moments générés par une charge répartie q, une charge nodale F, ou aux cas dans lesquels le moment atteint son maximum à l'extrémité initiale ou finale de la poutre.
La distribution de moments type qui se rapproche le plus de la distribution actuelle est retenue pour le calcul des facteurs C_1, C_2 et C_3.

ECCS 119/Galea

Lorsque ce paramètre est sélectionné, les coefficients de moment sont déterminés conformément à l'annexe B de l'ECCS 119, réf. [34].

Les valeurs de C_1 et C_2 présentées dans cette référence pour les cas de chargement combiné proviennent de la référence [28], qui fournit également les valeurs tabulées correspondantes ainsi qu'une plage de valeurs plus étendue.
La répartition réelle des moments est comparée à plusieurs répartitions de moments types. Ces répartitions types correspondent aux diagrammes de moments générés par une charge répartie q, une charge nodale F, ou aux cas dans lesquels le moment atteint sa valeur maximale à l'extrémité initiale ou finale de la poutre.
La distribution de moments type qui se rapproche le plus de la distribution réelle est retenue pour le calcul des facteurs C_1 et C_2.
Galea fournit uniquement des résultats pour les facteurs C_1 et C_2. Le facteur C_3 est déterminé à partir des tableaux 63 et 64 de l'annexe B de l'ECCS 119. Sa valeur est choisie en fonction du cas pour lequel la valeur de C_1 correspond le mieux à celle indiquée dans les tableaux.

Lopez, Yong, Serna

Lorsque cette méthode est sélectionnée, les coefficients de moment sont déterminés conformément à la méthode de López, Yong et Serna, réf. [35].
Avec cette méthode, les coefficients C_2 et C_3 sont fixés à zéro.
Le coefficient C_1 est calculé comme suit :

$$C_1 = \frac{\sqrt{\sqrt{k}A_1 + \left[\frac{(1-\sqrt{k})}{2}A_2\right]^2} + \frac{(1-\sqrt{k})}{2}A_2}{A_1}$$

Où :

$$k = \sqrt{k_1 k_2}$$

$$A_1 = \frac{M_{max}^2 + \alpha_1 M_1^2 + \alpha_2 M_2^2 + \alpha_3 M_3^2 + \alpha_4 M_4^2 + \alpha_5 M_5^2}{(1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5).M_{max}^2}$$

$$A_2 = \frac{M_1 + 2M_3 + 3M_3 + 4M_4 + 5M_5}{9.M_{max}}$$

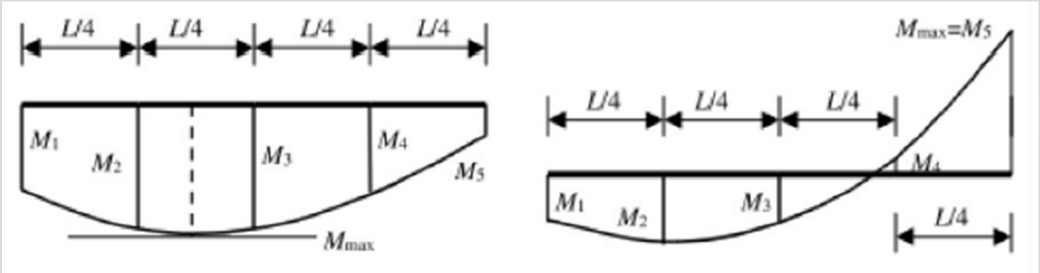
$$\alpha_1 = 1 - k_2$$

$$\alpha_2 = 5.\frac{k_1^3}{k_2^2}$$

$$\alpha_3 = 5.\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)$$

$$\alpha_4 = 5.\frac{k_2^3}{k_1^2}$$

$$\alpha_1 = 1 - k_1$$



Avec :

k_1 : pris égal à k_w.

k_2 : pris égal à k_w.

M_1 à M_5 : moments M_y déterminés dans le système de flambement dans les sections données comme montré sur la figure ci-dessus. Ces moments sont calculés en divisant la poutre en 10 parties (11 sections) et en interpolant entre ces sections.

M_{max} : pris égal à k_w.

Cette méthode est supportée uniquement si à la fois k et k_w sont égaux à 0,50 et 1,00.

Ci-dessous, un exemple dans SCIA Engineer est présenté dans lequel les trois méthodes sont effectuées.
Dans la « Configuration acier », la méthode de calcul choisie pour les coefficients C a été modifiée. Ci-dessous un aperçu des résultats de ces coefficients pour les trois méthodes :

ENV 1993-1-1 Annexe F	ECCS 119/Galea	Lopez, Yong, Serna

Mcr parameters		
LTB length L	12,000	m
Influence of load position	stabilising	
Correction factor k	1,00	
Correction factor kw	1,00	
LTB moment factor C1	1,89	
LTB moment factor C2	0,33	
LTB moment factor C3	2,64	
Shear center distance d,z	0,00	mm
Distance of load application z,g	-245,00	mm
Mono-symmetry constant beta,y	0,00	mm
Mono-symmetry constant z,j	0,00	mm

M_{CR} = 1576,03kN.m

Mcr parameters		
LTB length L	12,000	m
Influence of load position	stabilising	
Correction factor k	1,00	
Correction factor kw	1,00	
LTB moment factor C1	1,26	
LTB moment factor C2	0,45	
LTB moment factor C3	0,41	
Shear center distance d,z	0,00	mm
Distance of load application z,g	-245,00	mm
Mono-symmetry constant beta,y	0,00	mm
Mono-symmetry constant z,j	0,00	mm

M_{CR} = 1118,50kN.m

Mcr parameters		
LTB length L	12,000	m
Influence of load position	stabilising	
Correction factor k	1,00	
Correction factor kw	1,00	
LTB moment factor C1	1,20	
LTB moment factor C2	0,00	
LTB moment factor C3	0,00	
Shear center distance d,z	0,00	mm
Distance of load application z,g	-245,00	mm
Mono-symmetry constant beta,y	0,00	mm
Mono-symmetry constant z,j	0,00	mm

M_{CR} = 842,64kN.m

Il peut y avoir une très grande différence entre les trois modèles de calcul.

Dans la méthode « Lopez, Yong, Serna », les valeurs pour C2 et C3 sont toujours prises égales à 0.

Lorsqu'on compare les coefficients C1, la méthode selon l' « ECCS 119/Galea » et « Lopez, Yong Serna » sont approximativement les mêmes (respectivement 1,26 et 1,20), mais le coefficient C1 selon l' « ENV 1993-1-1 annexe F » donne une valeur totalement différente : 1,89.

Pour les autres sections prises en charge, le moment critique élastique pour le moment critique de déversement Mcr est donné par :

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G.I_t}{\pi^2 EI_z}}$$

Avec :

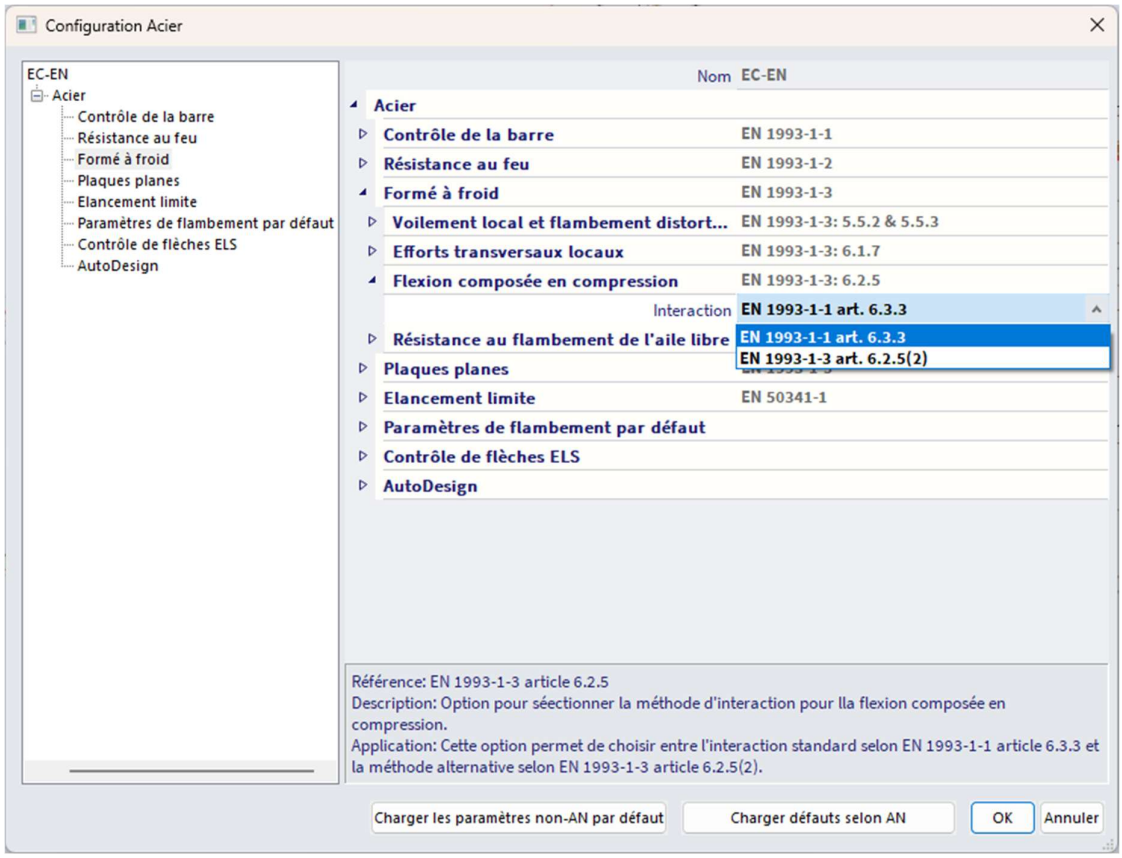
E Module d'élasticité
G Module de cisaillement
L Longueur de la poutre entre des points qui ont des maintiens au déversement
I_w Constante de gauchissement
I_t Constante de torsion
I_z Moment d'inertie selon l'axe faible

E. Flexion et compression

Le contrôle combiné en flexion et compression est effectué selon l'EN 1993-1-3, article 6.2.5, selon deux possibilités :

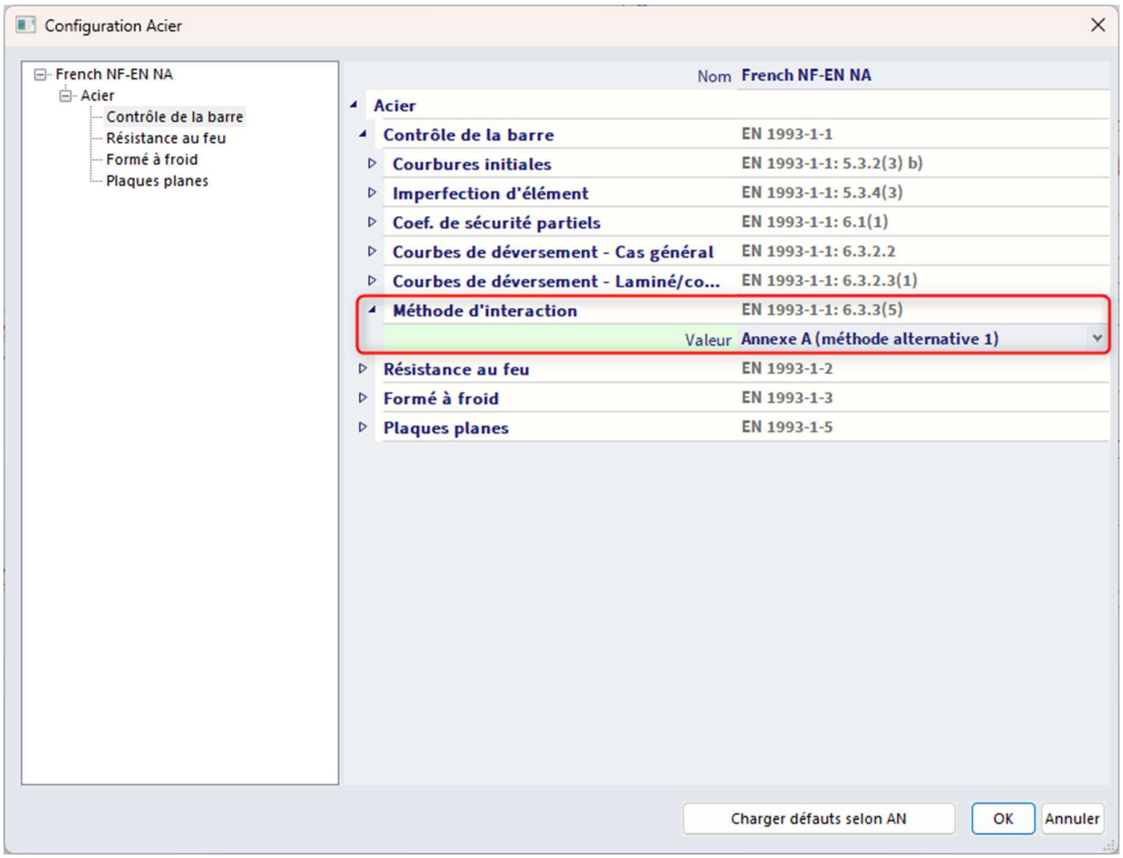
- Utiliser l'EN 1993-1-1 et l'interaction définie à l'article 6.3.3
- Utiliser l'alternative selon l'EN 1993-1-3 article 6.2.5(2)

Le choix entre ces deux méthodes est disponible dans la « Configuration acier » :



La formule (6.36) de l'EN 1993-1-3 prend en compte la résistance au moment fléchissant selon l'axe fort $M_{b,Rd}$. Toutefois, aucune indication n'est donnée concernant un moment fléchissant selon l'axe faible. Par conséquent, lorsqu'un moment fléchissant selon l'axe faible est présent, cette interaction ne peut pas être appliquée. Il convient alors d'utiliser la formule d'interaction générale conformément à la norme EN 1993-1-1.

Pour l'interaction décrite à l'article 6.3 de la norme EN 1993-1-1, deux méthodes peuvent être choisies, conformément à l'annexe A ou à l'annexe B de cette même norme.
L'annexe nationale de chaque pays précise laquelle de ces deux méthodes doit être utilisée. Ce choix peut également être défini dans SCIA Engineer, dans les paramètres de l'annexe nationale correspondant à la norme EN 1993-1-1.



F. Flexion et traction

Le contrôle combiné en flexion et traction est effectué selon l'EN 1993-1-3, article 6.3.

La norme spécifie que les mêmes équations que pour la compression doivent être utilisées. Cela dit ces équations d'interaction ne sont pas valides en cas de traction.

Le but du contrôle d'interaction pour la flexion et la traction est de vérifier les contraintes à la fibre en compression. Dans la norme AISI NAS 2007 Réf[4], la formule donnée à l'article C5 peut être réécrite en utilisant les notations de l'EC-EN comme suit :

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{c,z,Rd,com}} - \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

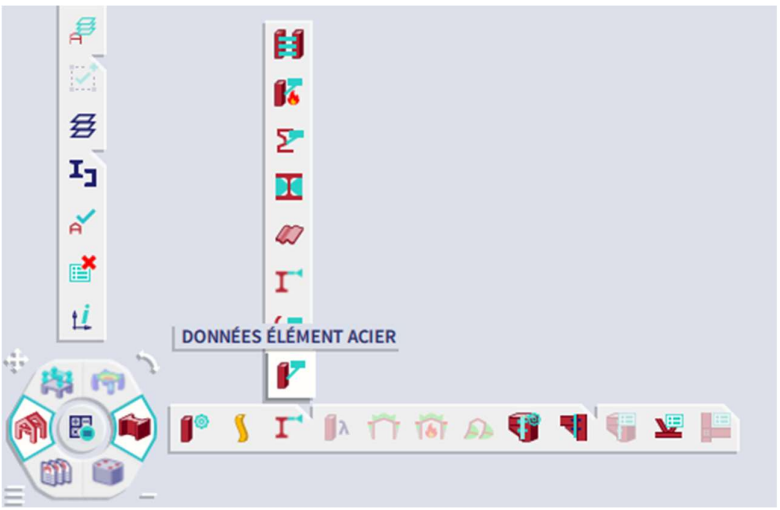
Avec :

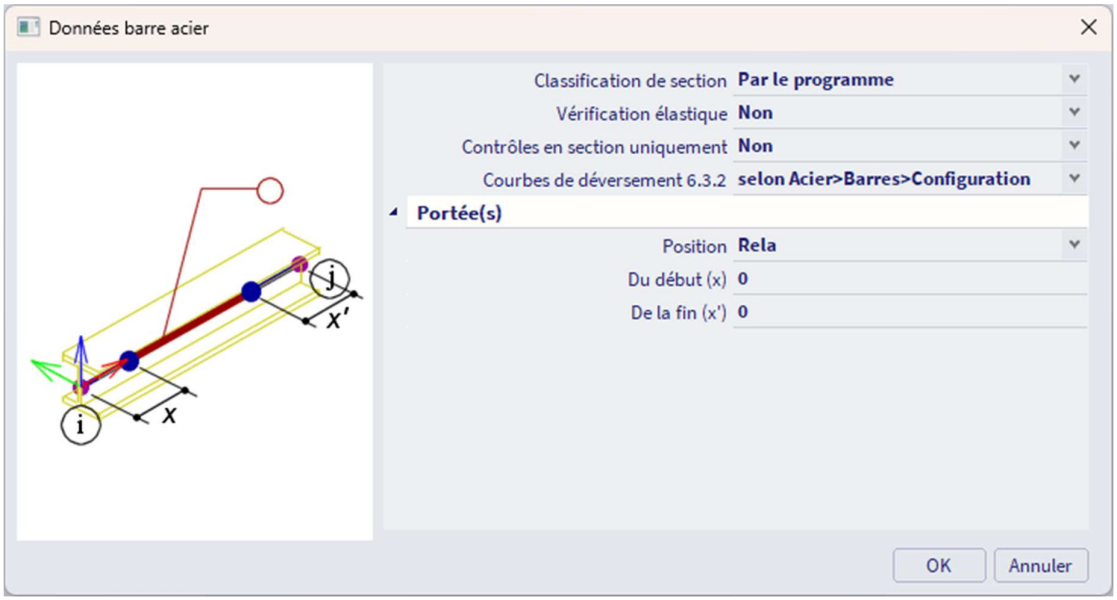
- $M_{y,Ed}$ Résistance au flambement torsionnel latéral
- $M_{c,z,Rd,com}$ Résistance de moment pour la fibre comprimée en cas de M_z
- $N_{t,Rd}$ Résistance en traction

6.3. Données additionnelles

A. Données d'élément acier

Certaines des valeurs par défaut de la « Configuration acier » peuvent être écrasées pour un élément individuel en utilisant les « Données d'élément acier », accessible depuis le poste de travail « Acier » dans la roue des processus :





« Classification de la section » :
Pour les éléments sélectionnés, la classification de la section générée par le programme sera écrasée et remplacée par les paramètres de l'utilisateur. Cela n'a un effet que lorsque la classification introduite est supportée.

« Vérification élastique uniquement » :
Les éléments sélectionnés seront classifiés en classe 3 (EL-EL). Cela signifie que la classe 1, la classe 2 et les sections élancées ne sont pas prises en charge.

« Contrôle de section uniquement » :
Pour les éléments sélectionnés, seul le contrôle en section est effectué (la « méthode exacte » pour DIN 18800).

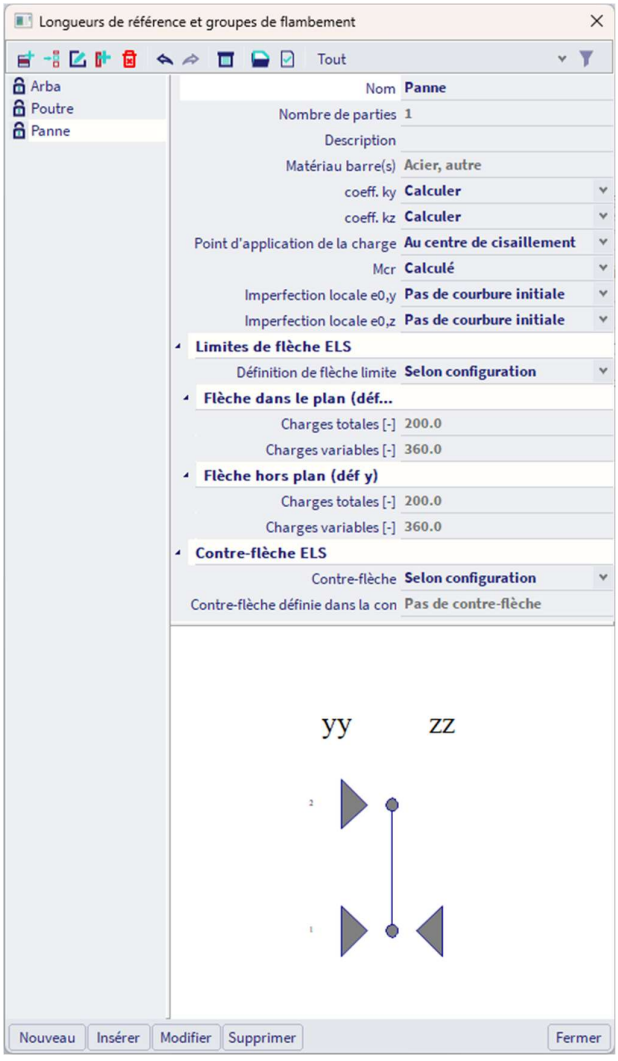
« Courbes de déversement LTB 6.3.2 » :
Pour les éléments sélectionnés, le « cas général » ou un « profilé laminé / profilé soudé équivalent » est utilisé pour les courbes de déversement LTB.

« Champ » :
Seuls les efforts internes dans le champs sont considéré pendant le contrôle acier.

B. Longueurs système et groupes de flambement

La fenêtre « Longueurs système et groupes de flambement » est une bibliothèque dans laquelle tous les groupes de flambement sont rassemblés. Cela donne à l'utilisateur un aperçu de tous les groupes de flambement et permet d'éditer les paramètres de flambement définis dans ces groupes.

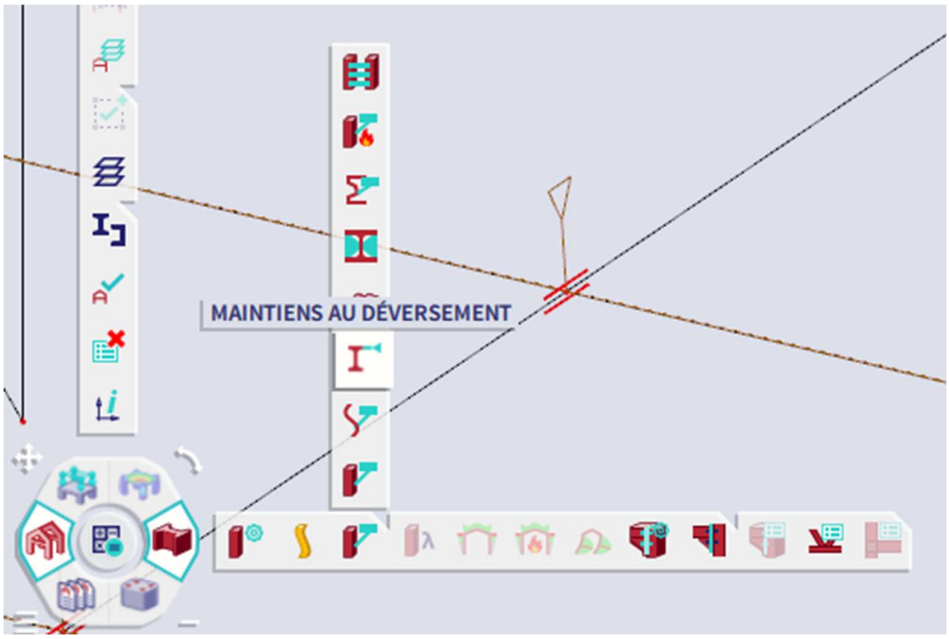
Cette boite de dialogue est accessible via le menu principal « Bibliothèque / Structure et analyse / Groupes de flambement ».



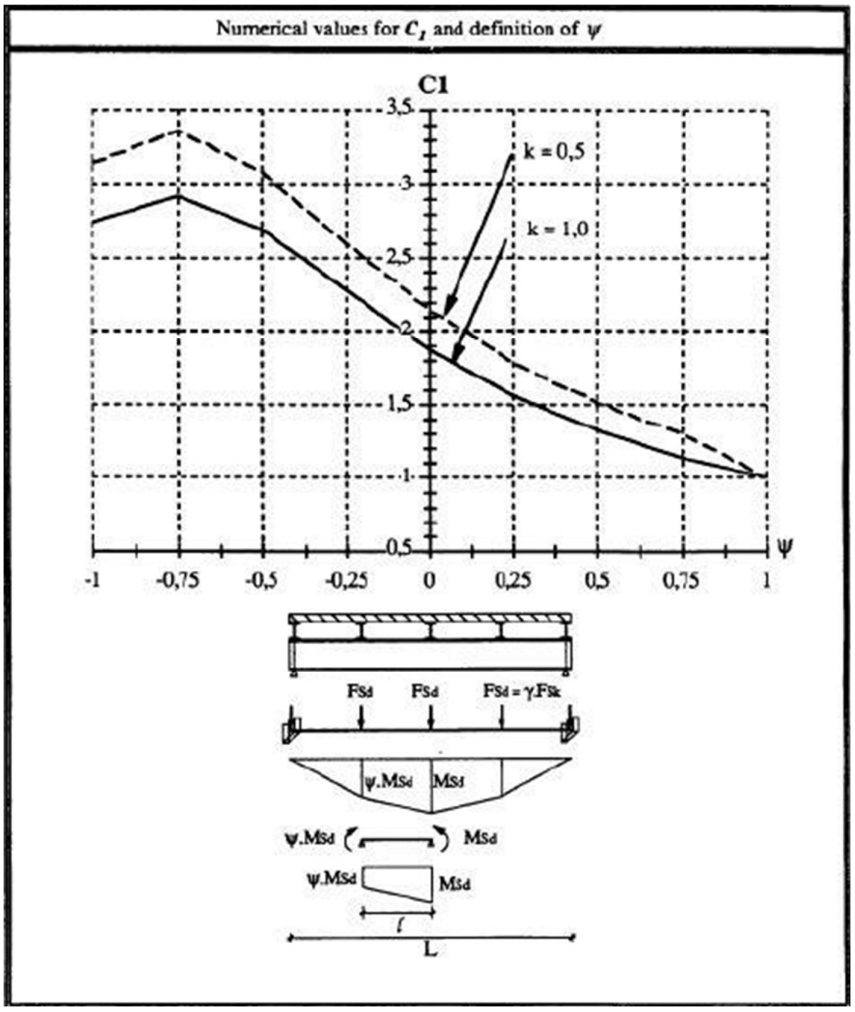
Dans la partie gauche, une liste présente les groupes de flambement définis dans le projet. Cette liste permet une sélection multiple, ce qui autorise l'utilisateur à modifier simultanément les paramètres communs de plusieurs groupes de flambement dans cette boîte de dialogue.
Dans la partie droite de la boîte de dialogue, l'utilisateur retrouve les paramètres de base du ou des groupes de flambement sélectionnés.

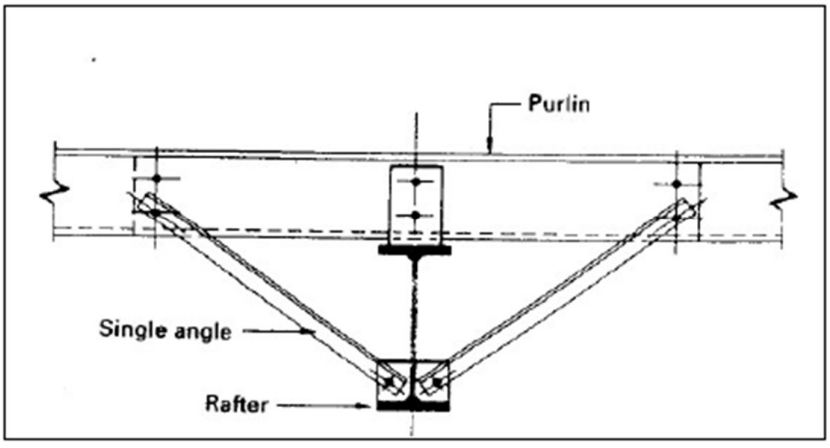
En bas de la boîte de dialogue, plusieurs boutons permettent à l'utilisateur de modifier le contenu de la liste. Le bouton « Nouveau » permet à l'utilisateur de créer un nouveau groupe de flambement en bas de la liste. Le bouton « Insérer » permet d'insérer un nouveau groupe de flambement sous celui sélectionné. Le bouton « Modifier » permet d'éditer et modifier le groupe sélectionné. Enfin, le bouton « Supprimer » permet de supprimer le ou les groupes de flambement sélectionnés.

C. Maintiens au déversement



Les données relatives au déversement définies par l'utilisateur dans les groupes de flambement sont combinées avec les données provenant de la fenêtre « Maintiens au déversement ».
Les « Maintiens au déversement » peuvent être définis sur la semelle supérieure ou sur la semelle inférieure, à des emplacements fixes, ou être configurés comme des maintiens continus sur toute la longueur de la poutre.
Les longueurs de déversement de la semelle comprimée sont déterminées à partir des distances entre ces différents maintiens.
Les coefficients de moment de déversement sont calculés entre ces maintiens.


Numerical values for C_1 and definition of ψ
C1
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
k = 0,5
k = 1,0
-1
-0,75
-0,5
-0,25
0
0,25
0,5
0,75
1
ψ
Fsd
Fsd
Fsd = γ.Fsk
ψ.Msd
Msd
ψ.Msd
Msd
ψ.Msd
Msd
f
L


Purlin
Single angle
Rafter

Exemple : 10.WS_CFS.esa

Comparons le contrôle au déversement de la poutre B1 (sans maintiens au déversement) et la poutre B2 (avec maintiens au déversement) :

...::CONTRÔLE DE STABILITÉ::...

Contrôle déversement
Selon article EN 1993-1-3: 6.2.4
Selon article EN 1993-1-1: 6.3.2 et formule (6.55)

Paramètres de déversement		
Méthode pour la courbe de déversement	art. 6.3.2.2	
$W_{eff,y}$	1.9067e-05	m^3
Moment critique élastique M_{cr}	1.57	kNm
Élancement relatif $\lambda_{rel,LT}$	1.69	
Élancement limite $\lambda_{rel,LT,0}$	0.20	
Courbe de déversement	b	
Imperfection α_{LT}	0.34	
Coefficient de réduction χ_{LT}	0.28	
Résistance au flambement $M_{b,Rd}$	1.26	kNm
Contrôle unité	**1.59**	-

Paramètres M_{cr}		
Longueur de déversement	4.000	m
k	1.00	
k_w	1.00	
C_1	1.13	
C_2	0.45	
C_3	0.53	
Infl. pos. des charges	pas d'influence	

Note: Paramètres C selon ECCS 119 2006 / Galea 2002

Cet élément ne satisfait PAS le contrôle de stabilité !

...::CONTRÔLE DE STABILITÉ::...

Contrôle déversement
Selon article EN 1993-1-3: 6.2.4
Selon article EN 1993-1-1: 6.3.2 et formule (6.55)

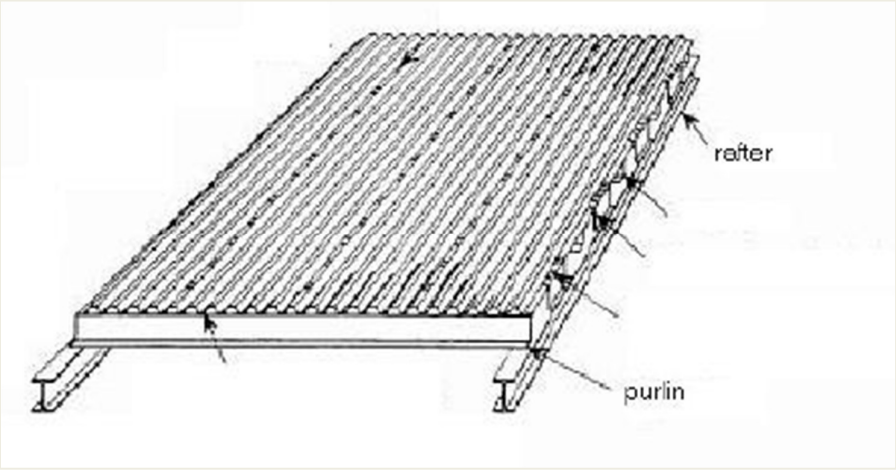
Paramètres de déversement		
Méthode pour la courbe de déversement	art. 6.3.2.2	
$W_{eff,y}$	1.9067e-05	m^3
Moment critique élastique M_{cr}	10.84	kNm
Élancement relatif $\lambda_{rel,LT}$	0.64	
Élancement limite $\lambda_{rel,LT,0}$	0.20	
Courbe de déversement	b	
Imperfection α_{LT}	0.34	
Coefficient de réduction χ_{LT}	0.81	
Résistance au flambement $M_{b,Rd}$	3.65	kNm
Contrôle unité	0.55	-

Paramètres M_{cr}		
Longueur de déversement	1.333	m
k	1.00	
k_w	1.00	
C_1	1.02	
C_2	0.05	
C_3	1.00	
Infl. pos. des charges	pas d'influence	

Note: Paramètres C selon ECCS 119 2006 / Galea 2002

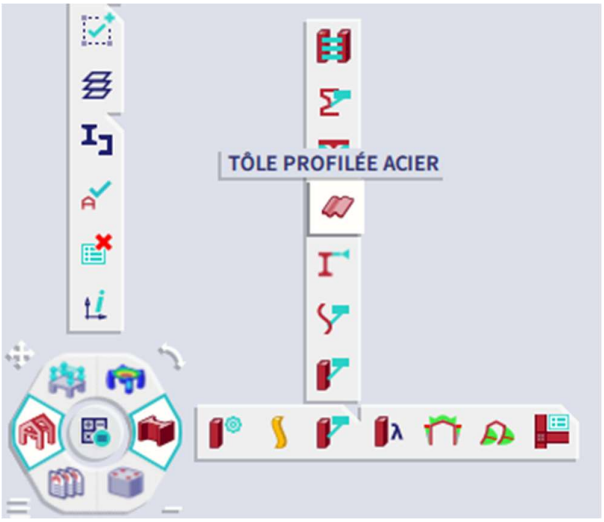
L'élément satisfait le contrôle de stabilité

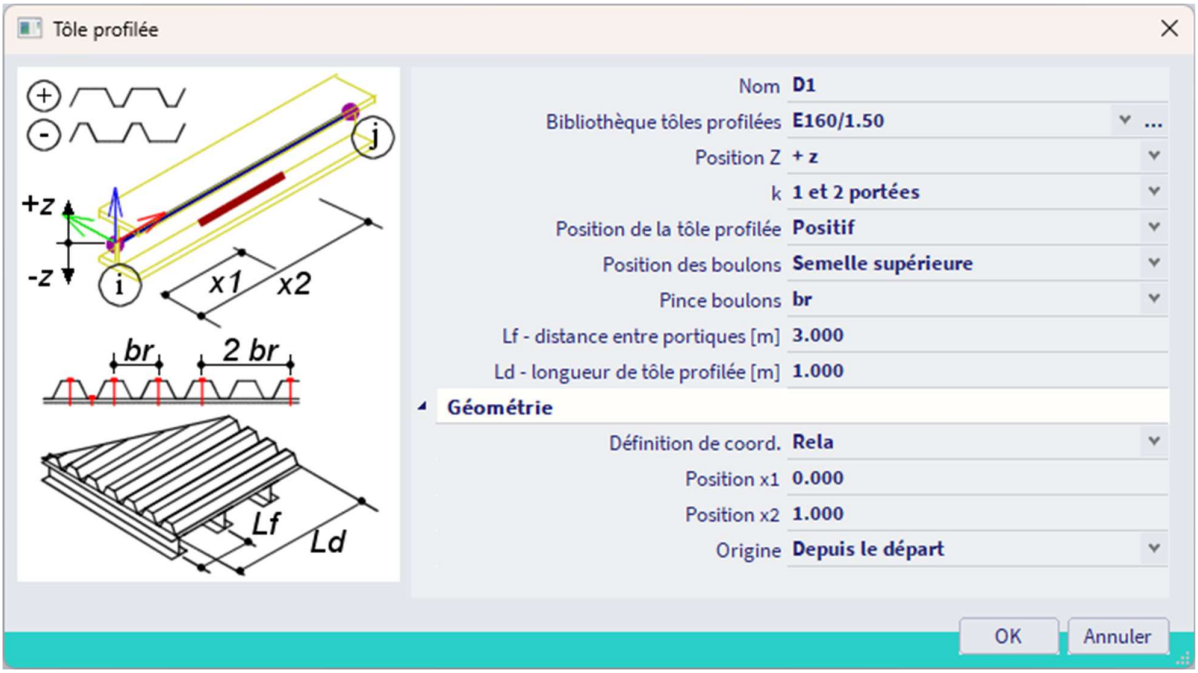
Chapitre 7: CALCUL DE PANNES



Pour les structures formées à froid, les tôles profilées peuvent être prises en compte dans les contrôles.

Les tôles doivent être appliquées à un élément 1D simple sous la forme d'une donnée additionnelle :

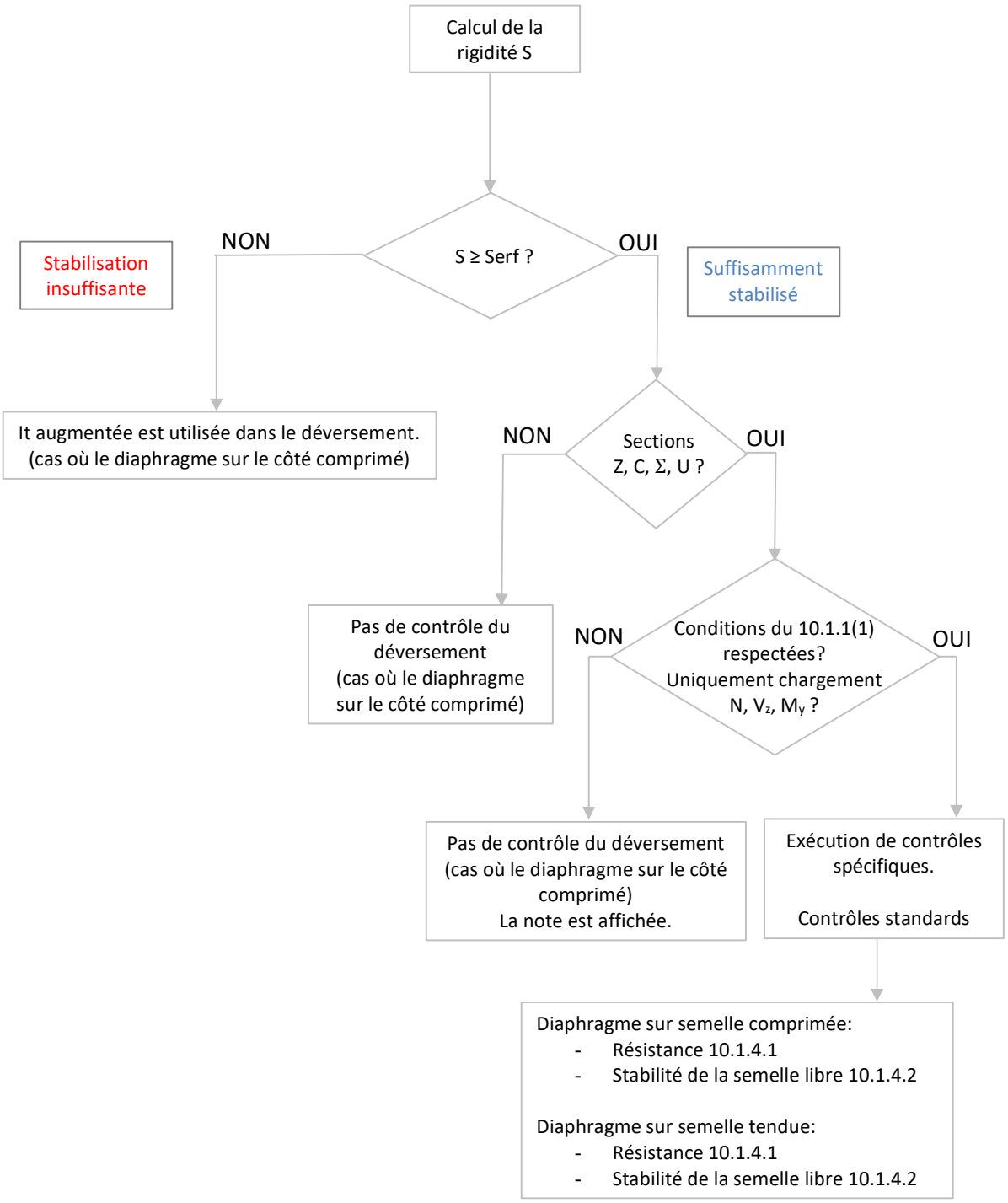




Les paramètres pour le diaphragme (tôle) sont :

k	La valeur du coefficient k dépend du nombre de portées du diaphragme : - k = 2 pour une ou deux portées - k = 4 pour trois ou davantage de portées
Position du diaphragme	La position du diaphragme peut être ou bien positive ou bien négative : - « Positive » signifie que le diaphragme est assemblé de manière à ce que la largeur est plus grande au niveau de l'aile supérieure. - « Négative » signifie que le diaphragme est assemblé de manière à ce que la largeur est plus grande au niveau de l'aile inférieure.
Position des boulons	Les boulons peuvent être positionnés ou bien sur le côté supérieur ou sur le côté inférieur du diaphragme.
Entraxe longitudinal des boulons	Les boulons peuvent être ou bien : - Dans chaque nervure (c'est-à-dire « br ») - Toutes les deux nervures (c'est-à-dire « 2.br »)
Distance entre portiques	Il s'agit de la distance entre portiques.
Longueur	Il s'agit de la longueur du diaphragme (champ de cisaillement)
Géométrie	
Position x1	La valeur x1 définit le point de départ de la tôle sur la poutre.
Position x2	La valeur x2 définit le point de fin de la tôle sur la poutre.
Définition des coordonnées	Il s'agit du système de coordonnées dans lequel la position x est saisie.
Origine	Il s'agit de la définition de l'origine à partir de laquelle la position x est mesurée.

7.1. Aperçu


Calcul de la rigidité S
S ≥ Serf ?
NON
OUI
Stabilisation insuffisante
Suffisamment stabilisé
It augmentée est utilisée dans le déversement. (cas où le diaphragme sur le côté comprimé)
Sections Z, C, Σ, U ?
NON
OUI
Pas de contrôle du déversement (cas où le diaphragme sur le côté comprimé)
Conditions du 10.1.1(1) respectées? Uniquement chargement N, Vz, My ?
NON
OUI
Pas de contrôle du déversement (cas où le diaphragme sur le côté comprimé) La note est affichée.
Exécution de contrôles spécifiques.
Contrôles standards
Diaphragme sur semelle comprimée:
- Résistance 10.1.4.1
- Stabilité de la semelle libre 10.1.4.2
Diaphragme sur semelle tendue:
- Résistance 10.1.4.1
- Stabilité de la semelle libre 10.1.4.2

Tout d'abord, la rigidité latérale S du diaphragme est déterminé et comparé à la rigidité requise S_{erf}.
La rigidité latérale S est calculée selon la Réf. [5], 3.5 et Réf. [6], 3.3.4.

$$S = \frac{a.10^4}{K_1 + \frac{K_2}{L_s}}$$

Où :

a : distance entre portiques
L_s : longueur du diaphragme
k_1 : coefficient de diaphragme
k_2 : coefficient de diaphragme

Comme spécifié dans l'EN 1993-1-3 art. 10.1.1, la rigidité de cisaillement S est remplacée par 0,2.S dans le cas où le diaphragme est connecté à une nervure sur deux uniquement.
Et la rigidité nécessaire S_{erf} est déterminée selon l'EN 1993-1-3 art. 10.1.1.

$$S_{erf} = \left(E.I_w.\frac{\pi^2}{L^2} + G.I_t + E.I_z.\frac{\pi^2}{L^2}.0{,}25.h^2\right).\frac{70}{h^2}$$

Dans le cas où $S < S_{erf}$, l'élément est reconnu comme « non contreventé ».

Dans ce cas, lorsque le diaphragme est situé sur le côté comprimé, le contrôle au déversement est effectué en utilisant la rigidité torsionnel augmentée I_t.

$$I_{t,id} = I_t + vorC_\vartheta.\frac{l^2}{\pi^2 G}$$

Avec :

l	Longueur de déversement
G	Module de cisaillement
$vorC_\vartheta$	Rigidité en rotation du diaphragme

Dans le cas où $S \geq S_{erf}$, l'élément est reconnu comme « totalement contreventé ».

Dans ce cas, un premier test est effectué pour évaluer si les contrôles spéciaux de pannes selon l'EN 1993-1-3, chapitre 10, peuvent être appliqués : ce chapitre est appliqué uniquement dans le cas de sections en Z, C, Sigma ou U.

<u>NB</u> : La norme spécifie que le chapitre s'applique également aux profilés en forme de chapeau (Omega). Cependant, dans les paragraphes suivants, aucune formule spécifique n'est donnée pour les profilés Oméga. Par exemple, la géométrie de la semelle libre est décrite uniquement pour les profilés en Z, en C et en Sigma, mais pas pour les profilés Oméga. Les profilés Oméga ne sont donc pas pris en charge dans ce chapitre spécifique de SCIA Engineer.

Si la section ne correspond à aucun des types de profilés mentionnés précédemment, les vérifications par défaut sont effectuées.
Étant donné que l'élément est considéré comme entièrement maintenu, aucune vérification au déversement n'est nécessaire lorsque le diaphragme est situé du côté comprimé.

Si la section correspond à l'un des codes de forme définis dans la liste, un deuxième contrôle est effectué.

Plus précisément, les vérifications spécifiques aux pannes, conformément au chapitre 10 de la norme EN 1993-1-3, peuvent être appliquées uniquement si les conditions suivantes sont remplies :

- Les limites en termes de dimension définies à l'article 10.1.1(1) sont respectées.
- La section est soumise uniquement aux efforts N, V_z et M_y. En effet, le chapitre 10 ne définit que des vérifications relatives aux effets dans le plan, associés à ces trois sollicitations : effort normal N, effort tranchant V_z et moment fléchissant M_y.

Pour une section qui remplit toutes les conditions, sont alors effectués :

- Les contrôles réduits par défaut, c'est-à-dire pas la totalité des contrôles standards.
- Les contrôles spéciaux de pannes selon le chapitre 10

Contrôle en section	Article
Traction axiale	6.1.2
Compression axiale	6.1.3
Moment fléchissant	6.1.4
Effort de cisaillement	6.1.5
Moment de torsion	Non
Efforts transversaux locaux	6.1.7
Traction et flexion combinées	Non
Compression et flexion combinées	Non
Cisaillement, effort normal et moment fléchissant combinés	6.1.10
Flexion et efforts transversaux locaux combinés	6.1.11

Contrôle en stabilité	Article
Flambement flexionnel uniquement pour y-y	6.2.2
Flambement torsionnel et flexionnel-torsionnel	Non
Déversement	Non
Compression axiale et flexion	Non
Traction axiale et flexion	Non

⇨ La vérification du moment de torsion ne sera jamais effectuée dans ce cas, puisque la condition préalable impose que la section soit soumise uniquement aux sollicitations N, V_z et M_y.

⇨ Les vérifications combinées de l'effort axial et de la flexion ne sont pas effectuées, car elles sont remplacées par les vérifications spécifiques aux pannes.

⇨ La vérification du flambement par flexion est effectuée pour le flambement selon l'axe y-y, conformément à l'article 10.1.4.2(2) de la norme EN 1993-1-3.

⇨ Le flambement par torsion et le déversement sont empêchés par le diaphragme, considéré comme assurant un maintien complet.

⇨ La compression dans la semelle libre est prise en compte dans les vérifications spécifiques aux pannes.

⇨ Les vérifications combinées de stabilité ne sont pas effectuées, car elles sont remplacées par les vérifications spécifiques aux pannes.

NB : Contrairement aux dispositions de l'article 10.1.3.3(2), la vérification sous charge transversale locale, ainsi que son interaction avec le moment fléchissant, est effectuée même lorsque la réaction d'appui est un effort de traction.

Exemple : 08_WS_CFS_ Hall 2.esa

Regardons les contrôles selon la norme acier pour B112 :

Données de tôle profilée

Paramètres		
Rigidité effective S	8603.38	kN
Rigidité requise S_{erf}	785.63	kN
$S \geq S_{erf}$	Stabilisé	
$C_{\theta M,k}$	5.63	kNm/m
$C_{\theta P,k}$	2.00	kNm/m
$C_{\theta A,k}$	4.22	kNm/m
c_{100}	10.00	kNm/m
vorhC_θ	1.09	kNm/m

$I_{t,id}$ = 9.2720e-10 + 4.9336e-08 = 5.0264e-08 m^4

Cependant, les conditions relatives aux efforts internes (la section ne doit être sollicitée que par N, V_z et M_y) ne sont pas respectées. Par conséquent, aucune vérification spécifique aux pannes ne sera effectuée. Toutefois, aucune vérification au déversement ne sera non plus réalisée.

...::CONTRÔLE DE STABILITÉ::...

Poutre tenue par tôle profilée - Résistance au flambement de la semelle libre
Selon article EN 1993-1-3: 10.1.4.2 Tableau 10.2a et formule (10.7).
Selon article EN 1993-1-1: 6.3.2.3.

Longueur de flambement		
L_a	6.000	m
R	8.32	
η_1	0.41	
η_2	1.72	
η_3	1.11	
η_4	-0.18	
Longueur de flambement l_{fz}	1.470	m
i_{fz}	2.1683e-02	m
Élancement réduit λ_{fz}	0.72	

Coefficient de réduction		
Élancement limite $\lambda_{rel,LT,0}$	0.40	
Courbe de déversement	b	
Imperfection α_{LT}	0.34	
Coefficient de réduction χ_{LT}	0.86	
Contrôle unité	**1.84**	-

Cet élément ne satisfait PAS le contrôle de stabilité !

Supprimer la tôle et relancer le contrôle. Alors le contrôle au déversement est effectuée.

...::CONTRÔLE DE STABILITÉ::...

Contrôle déversement

Selon article EN 1993-1-3: 6.2.4

Selon article EN 1993-1-1: 6.3.2 et formule (6.55)

Paramètres de déversement		
Méthode pour la courbe de déversement	art. 6.3.2.2	
$W_{eff,y}$	4.2159e-05	m^3
Moment critique élastique M_{cr}	2.05	kNm
Élancement relatif $\lambda_{rel,LT}$	2.20	
Élancement limite $\lambda_{rel,LT,0}$	0.20	
Courbe de déversement	b	
Imperfection α_{LT}	0.34	
Coefficient de réduction χ_{LT}	0.18	
Résistance au flambement $M_{b,Rd}$	1.75	kNm
Contrôle unité	**4.69**	-

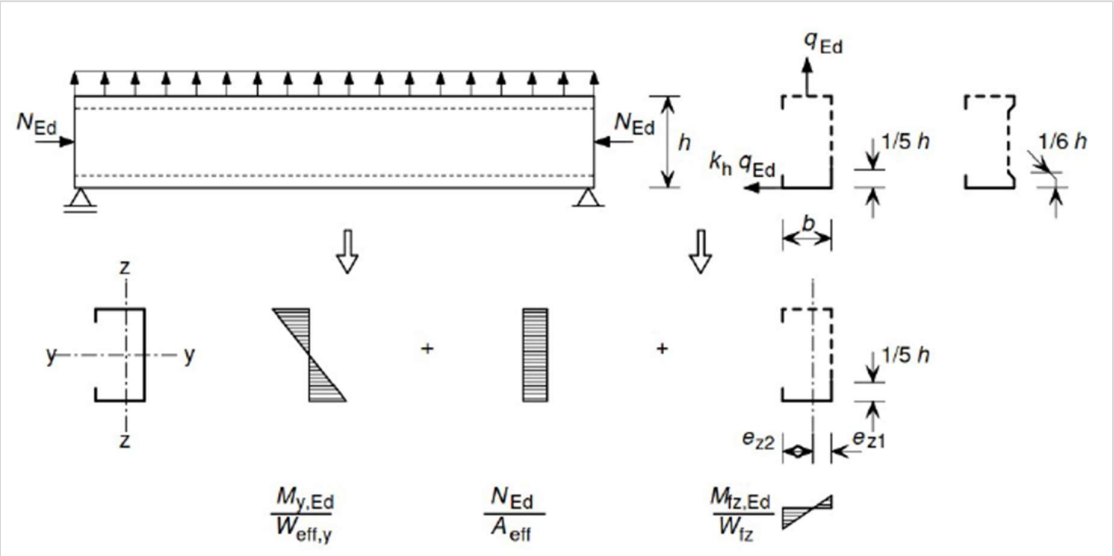
Paramètres M_{cr}		
Longueur de déversement	6.000	m
k	1.00	
k_w	1.00	
C_1	2.51	
C_2	1.49	
C_3	0.41	
Infl. pos. des charges	déstabilisant	

Note: Paramètres C selon ECCS 119 2006 / Galea 2002

7.2. Résistance de calcul

A. Résistance de section

Les section doit être vérifiée comme indiqué ci-dessous :



Il convient donc de superposer les sollicitations suivantes :

- Le moment fléchissant dans le plan $M_{y,Ed}$.
- L'effort axial N_{Ed}.
- Une charge latérale équivalente $q_{h,Ed}$, agissant sur la semelle libre, résultant de la torsion et de la flexion latérale.

Les contraintes maximales dans la section doivent respecter les critères suivants :

- Semelle maintenue

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

- Semelle libre

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

Où :

- W_{fz} est le module de section élastique brut de la section de la semelle libre, augmenté de la partie participante de l'âme, pour une flexion autour de l'axe z-z.

- A moins qu'une analyse plus approfondie ne soit effectuée, la partie participante de l'âme peut être considérée comme égale à : 1/5 de la hauteur de l'âme, mesurée à partir du point d'intersection entre l'âme et la semelle, dans le cas des profilés en C et en Z ; 1/6 de la hauteur de l'âme dans le cas d'une section sigma.

- $M_{fz,Ed}$ est le moment de flexion dans l'aile libre du à une charge horizontale $q_{h,Ed}$:

$$q_{h,Ed} = k_h.q_{Ed}$$

(voir aussi la figure ci-dessous)

et :

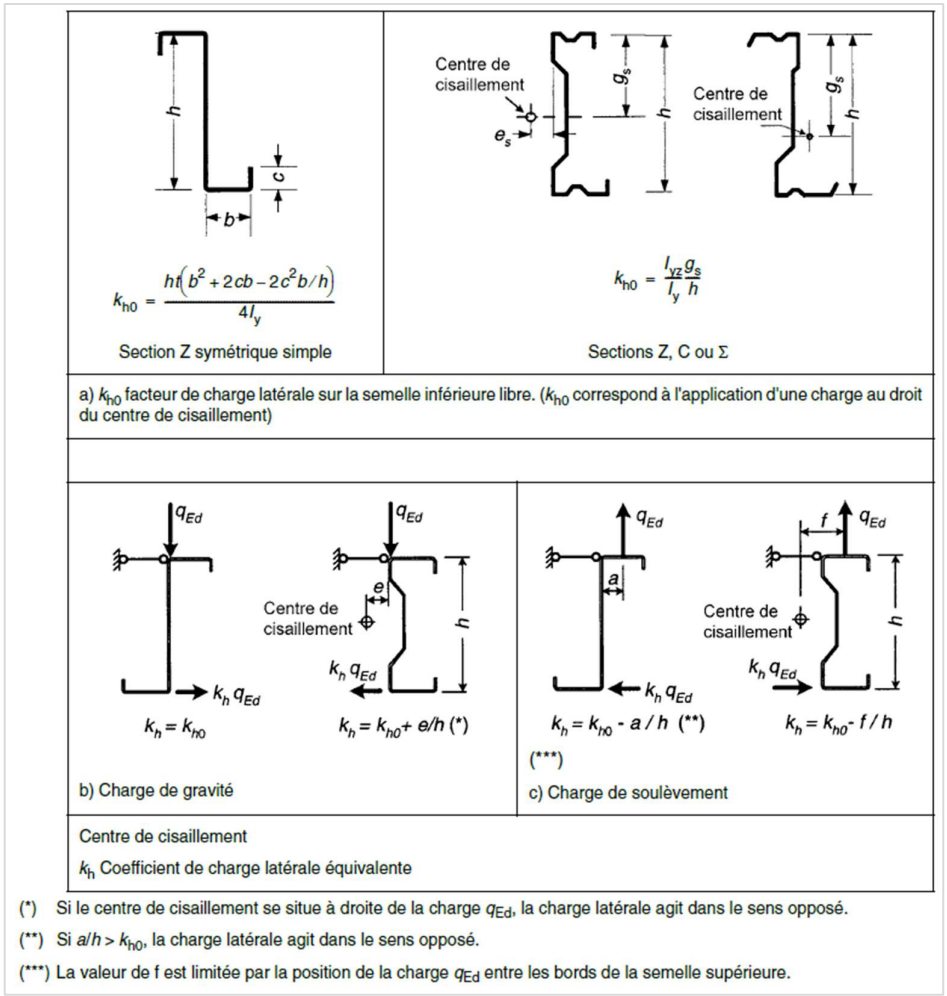
$$M_{fz,Ed} = \kappa_R.M_{0,fz,Ed}$$

Avec :

$M_{0,fz,Ed}$ correspond au moment fléchissant latéral initial dans la semelle libre, en l'absence de tout appui élastique.

κ_R est un coefficient de correction tenant compte de l'appui élastique effectif. Il peut être déterminé pour la position et les conditions aux limites considérées, en utilisant la théorie des poutres sur fondation élastique de Winkler.

Le tableau 10.1 de l'EN 1993-1-3 donne les formules pour déterminer $M_{0,fz,Ed}$ pour les positions spécifiques dans les poutres.



<u>NB</u> : Dans le cas où l'aile libre est en traction, $M_{fz,Ed}$ est pris égal à 0 (cf aussi EN 1993-1-3 art. 10.1.4.1(5)).

La rigidité latéral du ressort K est déterminé selon l'art. 10.1.5(4) de l'EN 1993-1-3 :

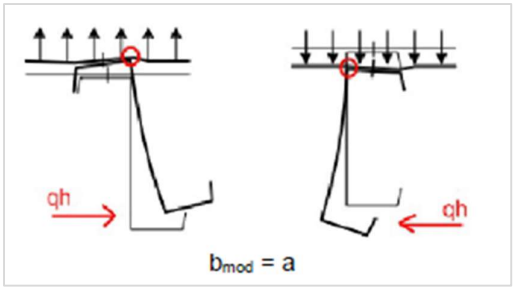
$$\frac{1}{K} = \frac{4.(1-\nu^2).h^2.(h_d + b_{mod})}{E.t^3} + \frac{h^2}{C_D}$$

Où :

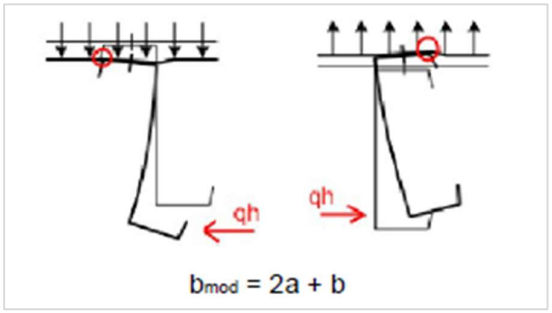
- t est l'épaisseur de la panne
- h, a, b, b_{mod}, h_d : cf figures ci-dessous
- C_D est la rigidité total du ressort de rotation et est pris égal à vorhC. Le calcul de cette valeur est donné ci-après.

<u>Détermination des propriétés h, a, b, b_{mod} et h_d</u>

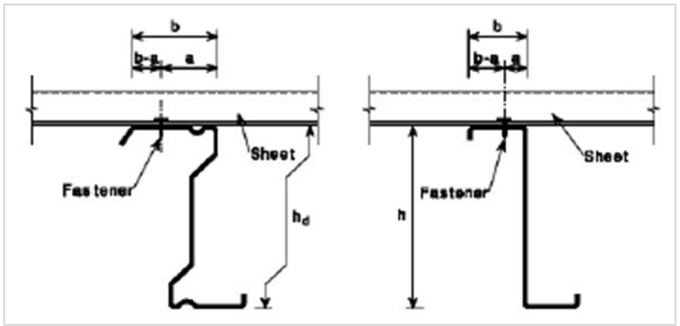
Si q_h amène la panne au contact du bardage au niveau de l'âme de la panne :



Si q_h amène la panne au contact du bardage de l'extrémité de l'aile de la panne :



Détermination de a et b :



Détermination de vorhC

$$I_{t,id} = I_t + vorhC_\vartheta . \frac{l^2}{\pi^2 G}$$

$$\frac{1}{vorhC_\vartheta} = \frac{1}{C_{\vartheta M,k}} + \frac{1}{C_{\vartheta A,k}} + \frac{1}{C_{\vartheta P,k}}$$

$$C_{\vartheta M,k} = k . \frac{E . I_{eff}}{s}$$

Si $b_a \leq 125$:

$$C_{\vartheta A,k} = C_{100} . \left[\frac{b_a}{100}\right]^2$$

Si $125 \leq b_a \leq 200$:

$$C_{\vartheta A,k} = 1{,}25 . C_{100} . \left[\frac{b_a}{100}\right]$$

$$C_{\vartheta P,k} \approx \frac{3 . E . I_s}{(h - t)}$$

$$I_s = \frac{s^3}{12}$$

Avec :

l	Longueur de déversement
G	Module de cisaillement
$vorhC_\vartheta$	Rigidité rotationnelle réelle du diaphragme
$C_{\vartheta M,k}$	Rigidité rotationnelle du diaphragme
$C_{\vartheta A,k}$	Rigidité rotationnelle de l'assemblage entre le diaphragme et la poutre
$C_{\vartheta P,k}$	Rigidité rotationnelle due à la distorsion de la poutre
k	Coefficient numérique = 2 pour une ou deux travées du diaphragme = 4 pour trois ou plus de travées du diaphragme
$E.I_{eff}$	Rigidité en flexion par unité de largeur du diaphragme
s	Espacement de la poutre
b_a	Largeur de l'aile de la poutre (en mm)
C_{100}	Coefficient en rotation (cf tableau)
h	Hauteur de la poutre
t	Épaisseur de l'aile de la poutre
s	Épaisseur de l'âme de la poutre

Ci-dessous quelques valeurs pour les coefficients de rotation :

Tableau 10.3 — Coefficient de rotation C_{100} pour les plaques à nervures trapézoïdales

Positionnement de la plaque		Tôle fixée en		Espacement des fixations		Diamètre des rondelles	C_{100}	$b_{T,max}$
Positif [1]	Négatif [1]	fond de nervure	sommet de nervure	$e = b_R$	$e = 2b_R$	[mm]	[kNm/m]	[mm]
Pour les charges de gravité :								
x		x		x		22	5,2	40
x		x			x	22	3,1	40
	x		x	x		K_a	10,0	40
	x		x		x	K_a	5,2	40
	x			x		22	3,1	120
	x				x	22	2,0	120
Pour les charges de soulèvement :								
x		x		x		16	2,6	40
x		x			x	16	1,7	40

Légende :

b_R est le pas des nervures ;

b_T est la largeur de la semelle de la nervure sur laquelle la panne est fixée.

K_a indique la présence de cavaliers en acier avec t ≥ 0,75 mm comme illustré ci-dessous

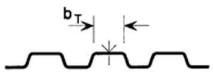


Tôle fixée :

— en fond de nervure :



— en sommet de nervure :



Les valeurs figurant dans ce tableau sont valables pour :

— des vis de fixation des tôles de diamètre : $\phi = 6,3$ mm ;

— des rondelles en acier d'épaisseur : $t_w \geq 1,0$ mm.

1) La position des plaques est déclarée positive lorsque la semelle étroite (creux d'onde) est en contact avec la panne et est déclarée négative lorsque la semelle large (plage) est en contact avec la panne.

B. Résistance de l'aile libre

Si l'aile libre est en compression, sa résistance au flambement doit être vérifiée, en utilisant :

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \cdot \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{W_{fz}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_{yb}}{\gamma_{M1}}$$

Et la longueur de flambement sera calculée par :

$$l_{fz} = \eta_1 L_a \cdot (1 + \eta_2 R^{\eta_3})^{\eta_4}$$

Avec η_1 à η_4 donnés dans les tableaux :

Tableau 10.2.a — Coefficients η_i pour une charge descendante avec 0, 1, 2, 3, 4 liernes

Situation	Nombre de liernes	η_1	η_2	η_3	η_4
Travée d'extrémité	0	0,414	1,72	1,11	– 0,178
Travée intermédiaire		0,657	8,17	2,22	– 0,107
Travée d'extrémité	1	0,515	1,26	0,868	– 0,242
Travée intermédiaire		0,596	2,33	1,15	– 0,192
Travée d'extrémité et intermédiaire	2	0,596	2,33	1,15	– 0,192
Travée d'extrémité et intermédiaire	3 et 4	0,694	5,45	1,27	– 0,168

Tableau 10.2.b — Coefficients η_i pour une charge de soulèvement avec 0, 1, 2, 3, 4 liernes

Situation	Nombre de liernes	η_1	η_2	η_3	η_4
Travée simple	0	0,694	5,45	1,27	– 0,168
Travée d'extrémité		0,515	1,26	0,868	– 0,242
Travée intermédiaire		0,306	0,232	0,742	– 0,279
Travées simple et d'extrémité	1	0,800	6,75	1,49	– 0,155
Travée intermédiaire		0,515	1,26	0,868	– 0,242
Travée simple	2	0,902	8,55	2,18	– 0,111
Travées d'extrémité et intermédiaire		0,800	6,75	1,49	– 0,155
Travées simple et d'extrémité	3 et 4	0,902	8,55	2,18	– 0,111
Travée intermédiaire		0,800	6,75	1,49	– 0,155

Si la compression le long de la longueur L est plus ou moins constante, avec l'application d'un effort axial relativement important, la longueur de flambement doit être déterminée en utilisant les valeurs de η_i pour le cas « plus de 3 liernes par travée », avec l'espacement réel L_a.

La notion d'"effort axial relativement important" est définie dans SCIA Engineer comme suit :

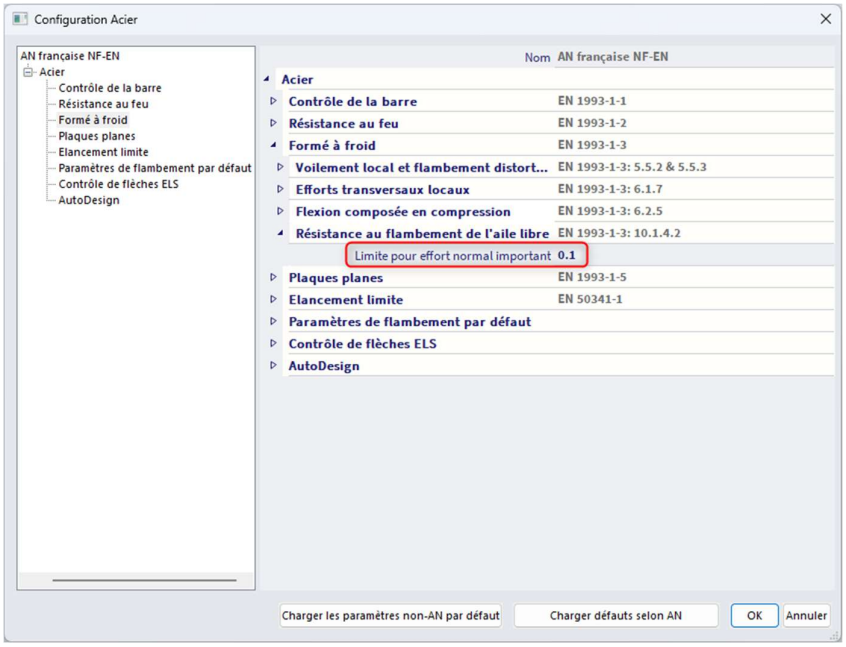
- Effort axial important si :

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} * \frac{f_{yb}}{\gamma_{M_1}}} \geq \text{limite}$$

- Effort axial faible :

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} * \frac{f_{yb}}{\gamma_{M_1}}} < \text{limite}$$

Par défaut, cette valeur limite est définie à 1 dans SCIA Engineer, mais cela peut être modifié dans la « Configuration acier » :



Exemple : 11.WS_CFS.esa

Dans un premier temps, effectuer le contrôle acier pour l'élément B2 :

Données de tôle profilée

Paramètres		
Rigidité effective S	8603.38	kN
Rigidité requise S_{erf}	649.96	kN
$S \geq S_{erf}$	Stabilisé	
$C_{\theta M,k}$	5.63	kNm/m
$C_{\theta P,k}$	5.56	kNm/m
$C_{\theta A,k}$	2.50	kNm/m
c_{100}	10.00	kNm/m
vorhC_θ	1.32	kNm/m

$I_{t,id}$ = 1.3008e-09 + 5.9618e-08 = 6.0919e-08 m^4

La condition pour effectuer un contrôle de panne est remplie (uniquement N, V_z et M_y) :

...::CONTRÔLE EN SECTION::...

La position du contrôle critique est 0.000 m

Efforts internes		Calculé	Moments additionnels	Total	Unité
Effort normal	N_{Ed}	-20.00		-20.00	kN
Effort tranchant	$V_{y,Ed}$	0.00		0.00	kN
Effort tranchant	$V_{z,Ed}$	3.75		3.75	kN
Torsion	T_{Ed}	0.00		0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{y,Ed}$	-4.49	0.00	-4.49	kNm
Moment de flexion	$M_{z,Ed}$	0.00	-0.03	-0.03	kNm

Ci-dessous le contrôle en section, le contrôle sur la « poutre maintenue par la tôle – résistance de la section » est donnée :

Poutre tenue par tôle profilée - Résistance en section

Selon article EN 1993-1-3: 10.1.4.1 et formule (10.3a), (10.3b).

Force Latérale Équivalente		
Charge verticale q_{Ed}	-1.00	kN/m
k_{h0}	-0.00	
e	19	mm
h	150	mm
k_h	0.13	
Charge latérale $q_{h,Ed}$	0.13	kN/m

Moment de flexion latéral		
Conditions de bord	Rotulé-Rotulé	
$M_{fz,Ed}$	0.00	kNm

Rigidité de ressort latéral		
a	25	mm
b	50	mm
h_d	150	mm
b_{mod}	25	mm
C_D	1.32	kNm/m
Rigidité latérale K	46.70	kN/m^2
I_{fz}	5.8294e-08	m^4
L_a	6.000	m
R	50.76	

Paramètres de vérification		
A_{eff}	5.4180e-04	m^2
$W_{eff,y}$ semelle tenue	2.6834e-05	m^3
$W_{eff,y}$ semelle libre	2.6834e-05	m^3
W_{fz}	1.7209e-07	m^3
γ_M	1.00	

Contrôle unité (10.3a) (-0.71) + 0.16 = 0.56 -
Contrôle unité (10.3b) 0.71 + 0.16 + 0.00 = 0.87 -

L'élément satisfait le contrôle en section.

Le contrôle de résistance au flambement de l'aile libre n'est pas effectué pour la poutre B2.

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} * \frac{f_{yb}}{\gamma_{M_1}}} < \text{limite} = 0{,}1$$

Le contrôle n'a donc pas lieu d'être.

Pour la poutre B1, l'effort normal a été augmenté et donc :

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} * \frac{f_{yb}}{\gamma_{M_1}}} \geq \text{limite} = 0{,}1$$

Ci-dessous le contrôle acier pour l'élément B1 :

Poutre tenue par tôle profilée - Résistance au flambement de la semelle libre
Selon article EN 1993-1-3: 10.1.4.2 Tableau 10.2a et formule (10.7).
Selon article EN 1993-1-1: 6.3.2.3.

Longueur de flambement		
L_a	6.000	m
R	50.76	
η_1	0.69	
η_2	5.45	
η_3	1.27	
η_4	-0.17	
Longueur de flambement l_{fz}	1.355	m
i_{fz}	0.0000e+00	m
Élancement réduit λ_{fz}	inf	

Coefficient de réduction		
Élancement limite $\lambda_{rel,LT,0}$	0.40	
Courbe de déversement	b	
Imperfection α_{LT}	0.34	
Coefficient de réduction χ_{LT}	-nan	
Contrôle unité	**-nan**	-

Remarque : La longueur de flambement de l'aile libre est déterminée conformément à l'article 10.1.4.2(5) en raison d'un « effort normal relativement important ».

L'élément satisfait le contrôle de stabilité

Chapitre 8: ANALYSE AU SECOND ORDRE

L'objectif de l'analyse globale est de déterminer la distribution des efforts internes, des moments, et des déplacements correspondants dans une structure soumise à un chargement spécifique.

La distinction la plus importante qui peut être faite entre les méthodes d'analyse est celle qui sépare les méthodes élastiques et plastiques. L'analyse plastique est soumise à quelques restrictions.

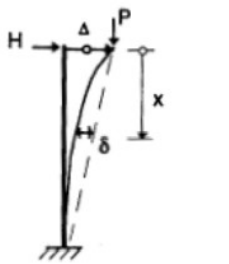
Une autre distinction importante concerne les méthodes qui prennent en compte, et celles qui négligent, les effets liés à la structure déformée. Il s'agit respectivement des méthodes basées sur **la théorie du second ordre et du premier ordre.**

La théorie du second ordre peut être appliquée dans tous les cas, alors que la théorie du premier ordre ne peut être utilisée que lorsque les effets de déplacements sur le comportement de la structure peuvent être négligés.

Les effets du second ordre sont constitués :
- d'effets du second ordre locaux ou sur un élément, appelés effets P-δ,
- et d'un effet du second ordre global, appelés effets P-Δ.



Théorie du premier ordre



Théorie du second ordre

La page suivante propose un aperçu de l'analyse globale selon l'EN 1993-1-1, chapitre 5 :

- toutes les règles de cet aperçu sont données dans l'EN 1993-1-1 art. 5. Pour chaque étape, la règle sera indiquée. La première règle (α_{cr} > 10) sera expliquée dans l'EN 1993-1-1 art. 5.2.1(3).

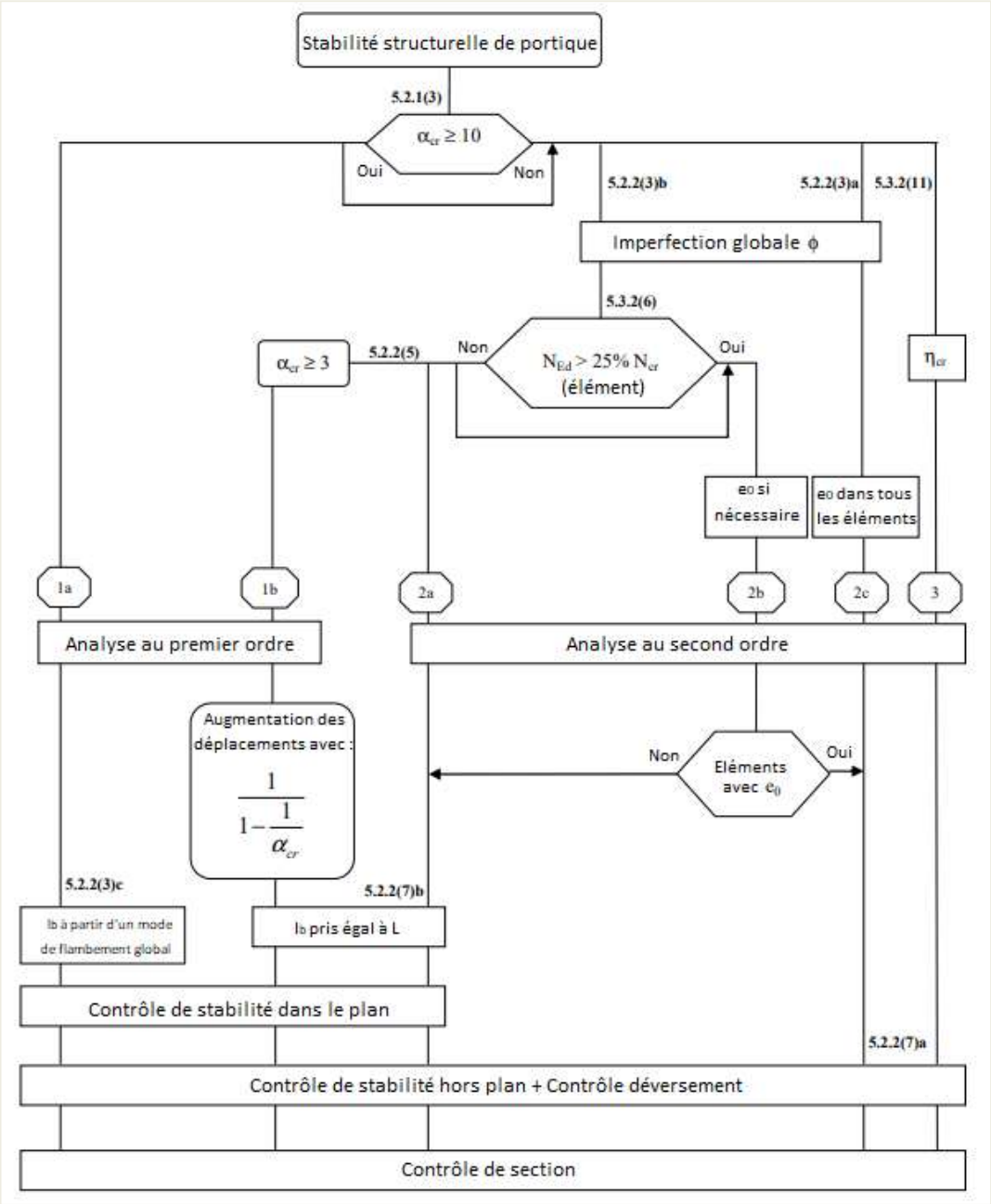
- Dans cet aperçu, trois chemins sont définis :

  - Chemin 1 : dans ce chemin, un calcul au premier ordre sera effectué.
  - Chemin 2 : dans ce chemin, un calcul au second ordre sera effectué avec les imperfections globales (et si nécessaire locales / en arc).
  - Chemin 3 : dans ce chemin, un calcul au second ordre sera effectué avec le mode de flambement de la construction comme imperfection.

- Le calcul sera plus précis si vous choisissez un chemin plus élevé.

- Les chemins les moins élevés effectueront un calcul rapide, car un calcul au premier ordre peut être fait sans itération. Mais cette théorie du premier ordre ne peut être appliquée que si les effets du déplacement sur le comportement de la structure peuvent être négligés.

Pour prendre en compte toutes les non-linéarités dans le modèle, des combinaisons de charges non-linéaires doivent être créées.



Avec :

- η_{cr} mode de flambement critique élastique
- L longueur de référence de l'élément
- l_b longueur de flambement

Pour les structures en acier formés à froid, une analyse au second ordre et les contrôles doivent être effectués exactement de la même manière que décrit dans l'EN 1993-1-1. Pour une description détaillée de ce type d'analyse et pour les contrôles, il faut se référer au manuel « Acier avancé ».

RÉFÉRENCES

[1] Eurocode 3
Design of steel structures
Part 1 – 3 : General rules Supplementary rules for cold-formed members and sheeting
EN 1993-1-3:2007

[2] Commentary and Worked examples to En 1993-1-5 “Plated Structural Elements”
Johansson B., Maquoi R., Sedlacek G., Müller C., Beg D,
ECCS 2007

[3] SN001a-EN-EU
NCCI: Critical axial load for torsional and flexural torsional buckling modes
Access Steel, 2006
www.access-steel.com

[4] AISI S100-2007
North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members
2007 Edition

[5] E. Kahlmeyer
Stahlbau nach DIN 18 800 (11.90)
Werner-Verlag, Düsseldorf

[6] Beuth-Kommentare
Stahlbauten
Erläuterungen zu DIN 18 800 Teil 1 bis Teil 4, 1.Auflage