

FORMATION AVANCEE
Contrôles Acier

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 2023 SCIA nv. Tous les droits sont réservés.

Sommaire

Sommaire	3
Chapitre 1: Introduction	7
Chapitre 2: Matériau	9
Chapitre 3: Sections et classification	13
3.1. Sections	13
3.2. Classification des sections	15
3.2.1. Contraintes élastiques	22
3.2.2. Intersection avec la surface de plastification	23
3.2.3. Approche itérative	24
3.2.4. Semi-Comp+	25
3.2.5. Section effective	28
Chapitre 4: Contrôle des sections ELU	33
4.1. Coefficients partiels de sécurité	33
4.2. Traction	34
4.3. Compression	34
4.4. Moment fléchissant	35
4.5. Cisaillement	37
4.6. Torsion	38
4.7. Contrôle combiné : flexion, cisaillement et effort normal	42
Chapitre 5: Vérification de la stabilité à l'ELU	47
5.1. Classification	47
5.2. Flambement flexionnel	47
5.2.1. Coefficients de flambement	48
5.2.2. Longueur de flambement	59
5.2.3. Contrôle du flambement flexionnel	64
5.3. Flambement torsionnel	69
5.4. Déversement	71
5.4.1. Calcul de M_{cr}	71
5.4.2. Contrôle du déversement	79
5.4.3. Appuis déversement	86
5.4.4. Tôle profilée	90
5.4.5. Déversement utilisant LTBII	95
5.5. Contrôle en flexion et compression	97
5.6. Contrôle du voilement – EN 1993-1-5	100
5.6.1. Généralité	100
5.6.2. Raidisseurs	102

Chapitre 6:	Vérification ELU des barres composées uniformes en compression à barrettes de liaison	105
Chapitre 7:	Optimisation	111
7.1.	Optimisation des sections	111
7.2.	Optimisation générale	114
7.3.	Eléments à inertie variable	117
Chapitre 8:	Calcul au second ordre et imperfections	119
8.1.	Aperçu	119
8.2.	Alpha critique	121
8.3.	Imperfection globale de portique φ	121
8.4.	Imperfection en arc e_0	126
8.4.1.	$N_{Ed} > 25\% \cdot N_{cr}$	126
8.4.2.	Imperfection en arc e_0	127
8.5.	Mode de flambement comme imperfection - η_{cr}	129
Chapitre 9:	Non-linéarité physique	135
9.1.	Rotules plastiques	135
9.2.	Analyse plastique générale	138
9.2.1.	Critère d'élasticité de Von Mises	138
9.2.2.	Modèle Eléments finis	138
9.2.3.	Propriétés du matériau	139
9.2.4.	Plasticité générale dans SCIA Engineer	140
Chapitre 10:	Contrôle ELS	145
10.1.	Déplacements nodaux	145
10.2.	Déformation relative – Contrôle ELS	146
Chapitre 11:	Vérification de la résistance au feu	153
11.1.	Général	153
11.1.1.	Courbes de température-temps	153
11.1.2.	Température de l'acier	154
11.1.3.	Propriétés de l'acier	156
11.1.4.	Propriétés de résistance au feu dans SCIA Engineer	159
11.2.	Méthodes de calcul	160
11.2.1.	Domaine de résistance	161
11.2.2.	Domaine Temps	168
11.2.3.	Domaine Température (itératif)	170
Chapitre 12:	Annexe A – Aires de cisaillement	173
Chapitre 13:	Annexe B – Exemple sur les chemins de calcul de l' Eurocode	175
13.1.	Chemin 1A : analyse au premier ordre	176
13.2.	Chemin 1B : analyse au premier ordre	179

13.3.	Chemin 2A : analyse au second ordre – imperfection global	185
13.4.	Chemin 2C : analyse au second ordre – imperfection globale + locale.....	187
13.5.	Chemin 3 : analyse au second ordre – mode de flambement comme imperfection	190
Chapitre 14:	Références et littératures.....	193

Chapitre 1: Introduction

Cette formation détaillera le calcul Acier conformément à l'EN 1993-1-1 : Règles générales et les règles pour les bâtiments, et à l'EN 1993-1-2 : Règles générales : calcul du comportement au feu.

La majorité des options de cette formation peut être utilisée / vérifiée dans SCIA Engineer avec l'**Edition Concept** (sen.ed.co.en ou esa.ed.ba).

Pour quelques vérifications supplémentaires, un module (ou édition) complémentaire sera nécessaire, cela sera toujours indiqué dans les paragraphes correspondants.

Chapitre 2: Matériau

Pour les nuances d'acier standards, la limite d'élasticité f_y et la résistance à la traction f_u dépendent de l'épaisseur de l'élément.

Les nuances d'aciers standards, comme définies dans le tableau 3.1 de l'EN 1993-1-1, sont :

Tableau 3.1 — Valeurs nominales de limite d'élasticité f_y et de résistance à la traction f_u pour les aciers de construction laminés à chaud

Norme et nuance d'acier	Épaisseur nominale t de l'élément [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Tableau 3.1 — Valeurs nominales de limite d'élasticité f_y et de résistance à la traction f_u pour les profils creux de construction

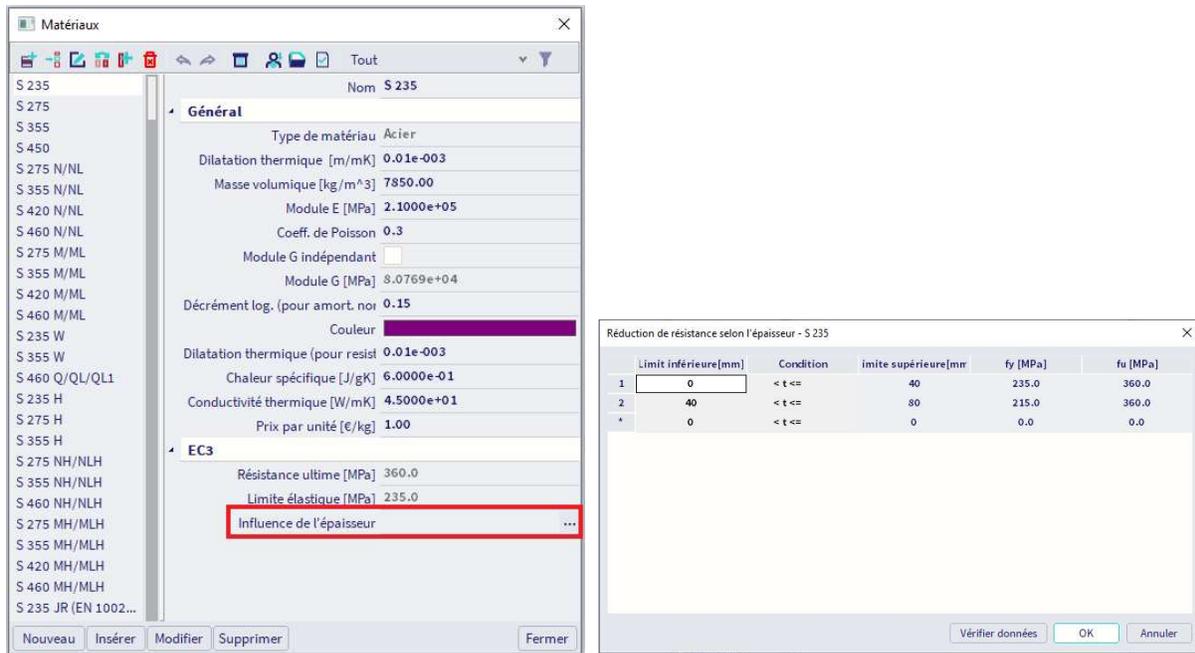
Norme et nuance d'acier	Épaisseur nominale t de l'élément [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NHL	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

Ces matériaux sont inclus dans SCIA Engineer. Vous les trouverez dans le menu Bibliothèques / Matériaux.

Les nuances d'aciers Histar et Fritenar ont été implémentées selon Arcelor.

Aussi, les matériaux de différentes normes de produit ont été implémentés dans le logiciel (par exemple les matériaux de l'annexe nationale belge NBN NA, ...).

Avec l'option « **Influence de l'épaisseur** », l'influence de l'épaisseur sur la limite d'élasticité f_y et sur la résistance à la traction f_u est prise en compte. Si un nouveau matériau utilisateur est défini dans SCIA Engineer, alors l'influence de l'épaisseur pour ce matériau devrait l'être également.

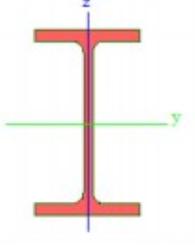
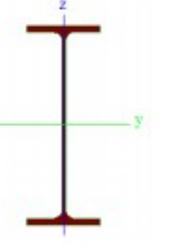
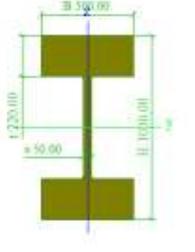
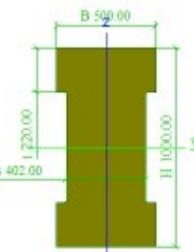


Exemple : NA_Material_Strength_Application.esa

Dans cet exemple, un matériau de l'annexe nationale belge a été saisi manuellement : S275 J2.
 Ce matériau a de nombreuses réductions de sa résistance en fonction de son épaisseur, comme on peut le voir dans le tableau ci-dessous :

	Limit inférieure[mm]	Condition	limite supérieure[mm]	fy [MPa]	fu [MPa]
1	0.00	< t <=	16.00	275.0	430.0
2	16.00	< t <=	40.00	265.0	430.0
3	40.00	< t <=	63.00	255.0	430.0
4	63.00	< t <=	80.00	245.0	430.0
5	80.00	< t <=	100.00	235.0	430.0
6	100.00	< t <=	150.00	225.0	430.0
7	150.00	< t <=	200.00	215.0	430.0
8	200.00	< t <=	250.00	205.0	430.0
9	250.00	< t <=	400.00	195.0	430.0
*	0.00	< t <=	0.00	0.0	0.0

Et pour chaque élément, la bonne limite d'élasticité a été prise en compte selon le tableau ci-dessus. Vous pouvez vérifier cela en lançant un calcul linéaire et en regardant les sorties détaillées du contrôle ELU sur chaque élément.

CS1	CS2	CS3	CS4																																																																								
 <p>Code de forme 1 - Section en I</p> <table border="1"> <tr><td>h [mm]</td><td>80.00</td></tr> <tr><td>b [mm]</td><td>46.00</td></tr> <tr><td>t [mm]</td><td>5.20</td></tr> <tr><td>s [mm]</td><td>3.80</td></tr> <tr><td>r [mm]</td><td>5.00</td></tr> <tr><td>r1 [mm]</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>a [%]</td><td>0</td></tr> <tr><td>W [mm]</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>wm [mm^2]</td><td>0.00</td></tr> </table>	h [mm]	80.00	b [mm]	46.00	t [mm]	5.20	s [mm]	3.80	r [mm]	5.00	r1 [mm]	0.00	a [%]	0	W [mm]	0.00	wm [mm^2]	0.00	 <p>Code de forme 1 - Section en I</p> <table border="1"> <tr><td>h [mm]</td><td>600.00</td></tr> <tr><td>b [mm]</td><td>220.00</td></tr> <tr><td>t [mm]</td><td>19.00</td></tr> <tr><td>s [mm]</td><td>12.00</td></tr> <tr><td>r [mm]</td><td>24.00</td></tr> <tr><td>r1 [mm]</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>a [%]</td><td>0</td></tr> <tr><td>W [mm]</td><td>116.00</td></tr> <tr><td>wm [mm^2]</td><td>0.00</td></tr> </table>	h [mm]	600.00	b [mm]	220.00	t [mm]	19.00	s [mm]	12.00	r [mm]	24.00	r1 [mm]	0.00	a [%]	0	W [mm]	116.00	wm [mm^2]	0.00	 <p>Code de forme 1 - Section en I</p> <table border="1"> <tr><td>h [mm]</td><td>1000.00</td></tr> <tr><td>b [mm]</td><td>500.00</td></tr> <tr><td>t [mm]</td><td>220.00</td></tr> <tr><td>s [mm]</td><td>50.00</td></tr> <tr><td>r [mm]</td><td>12.00</td></tr> <tr><td>r1 [mm]</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>a [%]</td><td>0</td></tr> <tr><td>W [mm]</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>wm [mm^2]</td><td>0.00</td></tr> </table>	h [mm]	1000.00	b [mm]	500.00	t [mm]	220.00	s [mm]	50.00	r [mm]	12.00	r1 [mm]	0.00	a [%]	0	W [mm]	0.00	wm [mm^2]	0.00	 <p>Code de forme 1 - Section en I</p> <table border="1"> <tr><td>h [mm]</td><td>1000.00</td></tr> <tr><td>b [mm]</td><td>500.00</td></tr> <tr><td>t [mm]</td><td>220.00</td></tr> <tr><td>s [mm]</td><td>402.00</td></tr> <tr><td>r [mm]</td><td>12.00</td></tr> <tr><td>r1 [mm]</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>a [%]</td><td>0</td></tr> <tr><td>W [mm]</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>wm [mm^2]</td><td>0.00</td></tr> </table>	h [mm]	1000.00	b [mm]	500.00	t [mm]	220.00	s [mm]	402.00	r [mm]	12.00	r1 [mm]	0.00	a [%]	0	W [mm]	0.00	wm [mm^2]	0.00
h [mm]	80.00																																																																										
b [mm]	46.00																																																																										
t [mm]	5.20																																																																										
s [mm]	3.80																																																																										
r [mm]	5.00																																																																										
r1 [mm]	0.00																																																																										
a [%]	0																																																																										
W [mm]	0.00																																																																										
wm [mm^2]	0.00																																																																										
h [mm]	600.00																																																																										
b [mm]	220.00																																																																										
t [mm]	19.00																																																																										
s [mm]	12.00																																																																										
r [mm]	24.00																																																																										
r1 [mm]	0.00																																																																										
a [%]	0																																																																										
W [mm]	116.00																																																																										
wm [mm^2]	0.00																																																																										
h [mm]	1000.00																																																																										
b [mm]	500.00																																																																										
t [mm]	220.00																																																																										
s [mm]	50.00																																																																										
r [mm]	12.00																																																																										
r1 [mm]	0.00																																																																										
a [%]	0																																																																										
W [mm]	0.00																																																																										
wm [mm^2]	0.00																																																																										
h [mm]	1000.00																																																																										
b [mm]	500.00																																																																										
t [mm]	220.00																																																																										
s [mm]	402.00																																																																										
r [mm]	12.00																																																																										
r1 [mm]	0.00																																																																										
a [%]	0																																																																										
W [mm]	0.00																																																																										
wm [mm^2]	0.00																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">Matériau</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Limite d'élasticité f_y</td><td>275,0</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>Résistance ultime f_u</td><td>435,0</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>Fabrication</td><td>Laminé</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Matériau			Limite d'élasticité f_y	275,0	MPa	Résistance ultime f_u	435,0	MPa	Fabrication	Laminé		<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">Matériau</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Limite d'élasticité f_y</td><td>265,0</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>Résistance ultime f_u</td><td>430,0</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>Fabrication</td><td>Laminé</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Matériau			Limite d'élasticité f_y	265,0	MPa	Résistance ultime f_u	430,0	MPa	Fabrication	Laminé		<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">Matériau</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Limite d'élasticité f_y</td><td>205,0</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>Résistance ultime f_u</td><td>430,0</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>Fabrication</td><td>Laminé</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Matériau			Limite d'élasticité f_y	205,0	MPa	Résistance ultime f_u	430,0	MPa	Fabrication	Laminé		<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">Matériau</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Limite d'élasticité f_y</td><td>195,0</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>Résistance ultime f_u</td><td>430,0</td><td>MPa</td></tr> <tr><td>Fabrication</td><td>Laminé</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Matériau			Limite d'élasticité f_y	195,0	MPa	Résistance ultime f_u	430,0	MPa	Fabrication	Laminé																									
Matériau																																																																											
Limite d'élasticité f_y	275,0	MPa																																																																									
Résistance ultime f_u	435,0	MPa																																																																									
Fabrication	Laminé																																																																										
Matériau																																																																											
Limite d'élasticité f_y	265,0	MPa																																																																									
Résistance ultime f_u	430,0	MPa																																																																									
Fabrication	Laminé																																																																										
Matériau																																																																											
Limite d'élasticité f_y	205,0	MPa																																																																									
Résistance ultime f_u	430,0	MPa																																																																									
Fabrication	Laminé																																																																										
Matériau																																																																											
Limite d'élasticité f_y	195,0	MPa																																																																									
Résistance ultime f_u	430,0	MPa																																																																									
Fabrication	Laminé																																																																										

Chapitre 3: Sections et classification

3.1. Sections

SCIA Engineer utilisera les axes y-y et z-z respectivement pour les axes principaux forts et faibles de la section. Si les axes principaux ne coïncident pas avec les axes y-y et z-z conformément à l'EN 1993-1-1, alors ces axes sont indiqués :

EN 1993-1-1	SCIA Engineer	EN 1993-1-1	SCIA Engineer

Dans le contrôle Acier, l'axe fort sera toujours l'axe y-y. Donc si un profilé est créé avec l'axe local y ne correspondant pas à l'axe fort, les axes seront inversés dans le contrôle Acier et SCIA Engineer renverra un message d'avertissement sur ces axes.

Cet inversion aura également un impact sur les paramètres de flambement pour yy et zz.

Contrôle flambement flexionnel

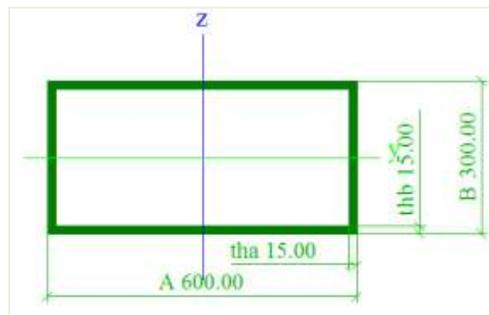
Selon EN 1993-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.46)

Paramètres de flambement		yy	zz	
Noeuds déplaçables		non-déplaçable	déplaçable	
Longueur système	L	5.000	5.000	m
Coefficient de flambement	k	1.00	1.35	
Longueur de flambement	l_{cr}	5.000	6.755	m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	3226.81	129.00	kN
Elancement	λ	50.11	250.64	
Elancement relatif	λ_{rel}	0.53	2.67	
Elancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.20	0.20	

Vous pouvez éviter ce comportement en créant la section différemment, de manière à ce que l'axe y reste l'axe fort. Ensuite, via les propriétés de l'élément, vous pouvez effectuer une rotation du système de coordonnées locales (rotation SCL) si nécessaire.

Exemple : Local Axes.esa

L'axe fort de cette section est l'axe local z :



Cette poutre est chargée uniquement par une charge linéaire suivant la direction z, il en résulte un moment M_y et un effort de cisaillement V_z .

Lorsqu'on regarde le contrôle acier, les axes sont inversés et l'axe fort est devenu l'axe local y :

La position du contrôle critique est 0.000 m

Définition d'axes :

- l'axe principal y dans ce contrôle correspond à l'axe principal z dans SCIA Engineer
- l'axe principal z dans ce contrôle correspond à l'axe principal y dans SCIA Engineer

Efforts internes		Calculé	Unité
Effort normal	N_{Ed}	0.00	kN
Effort tranchant	$V_{y,Ed}$	300.00	kN
Effort tranchant	$V_{z,Ed}$	0.00	kN
Torsion	T_{Ed}	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{y,Ed}$	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{z,Ed}$	-300.00	kNm

Cela est indiqué dans le contrôle acier, et les efforts internes sont aussi inversés en fonction des nouveaux axes locaux.

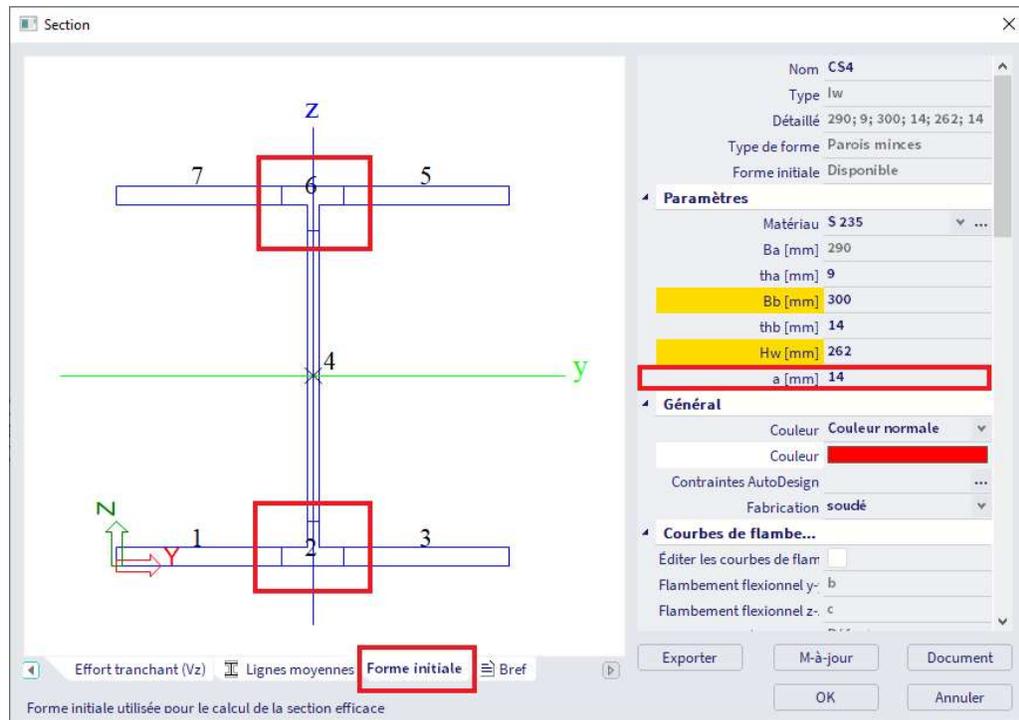
3.2. Classification des sections

Depuis SCIA Engineer 17.0, toutes les sections contenant une forme initiale peuvent être classifiées. Les sections sans forme initiale ne peuvent pas être classifiées et seront automatiquement vérifiées en classe 3.

Lorsque vous utilisez une section depuis la bibliothèque, la forme initiale est disponible. Si vous voulez utiliser une autre section, vous pouvez utiliser le groupe « Parois minces », pour lequel la forme initiale et les propriétés de torsion sont disponibles.

Exemple : Cross-section.esa

- 3 sections :
 - HEA300 depuis la bibliothèque de profilés
 - HEA300 saisie comme une section générale (importée en .dwg)
 - HEA300 saisie comme une section I_w en tôle soudée. En créant cette section, il est important que la bonne valeur pour le paramètre a soit définie en mm. Ce paramètre sera reconnu comme la partie fixe dans le calcul de la forme initiale.

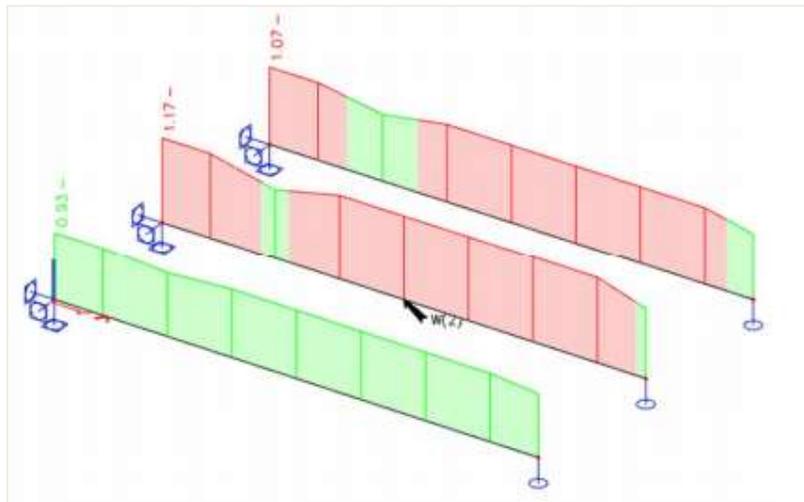


Editer la forme initiale

	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	1760	126	7	0	7	14	SO	aucun
2	150	11	859	126	7	174	7	14	F	aucun
3	237	7	1760	174	7	300	7	14	SO	aucun
4	150	145	2002	150	34	150	256	9	I	aucun
5	237	283	1760	174	283	300	283	14	SO	aucun
6	150	279	859	126	283	174	283	14	F	aucun
7	63	283	1760	126	283	0	283	14	SO	aucun

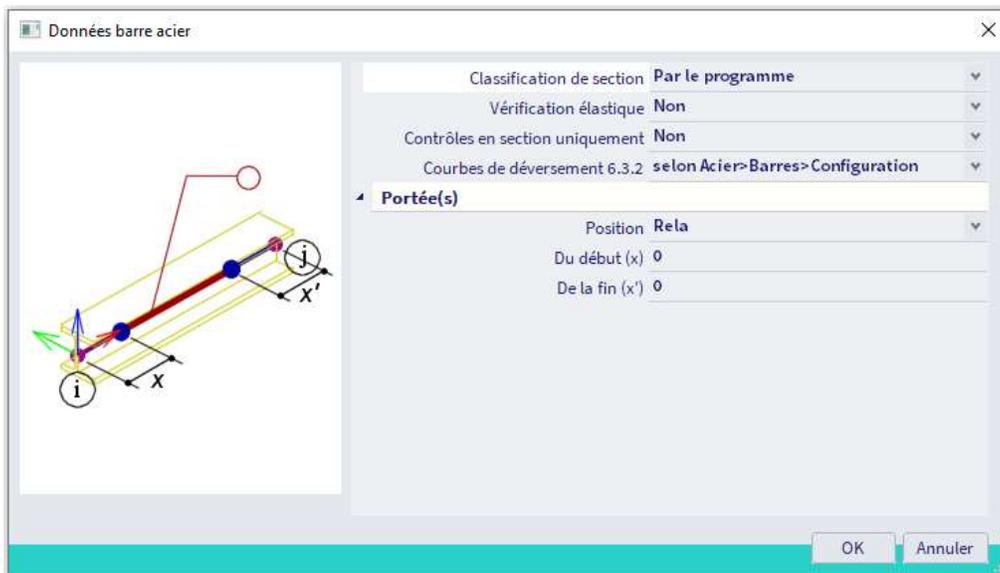
Dessiner les n° de parties Annuler

- Seuls le premier et le troisième profilés sont reconnus comme forme I symétrique contenant une forme initiale. Pour cette raison, le calcul de classification peut être effectué.
- Le second profilé n'est pas reconnu comme une forme en I symétrique et il n'y a pas de forme initiale disponible.
- Le premier et le troisième profilés seront classifiés comme un profilé en I et une vérification plastique sera effectuée.
- Le second profilé ne peut pas être classifié, une vérification élastique sera donc effectuée. Les contrôles donneront donc des résultats différents :



Note : une section générale ne peut pas être importée dans SCIA Engineer avec l'édition Concept. Pour cette fonctionnalité, il faut l'édition Professionnelle ou Expert (ou le module esa.07 / sen.05).

SCIA Engineer calcule la classification automatiquement, mais la classification calculée dans SCIA Engineer peut être conditionnée par deux paramètres dans les données des éléments acier :

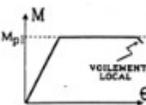
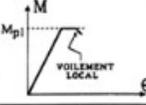
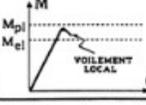
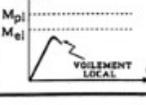


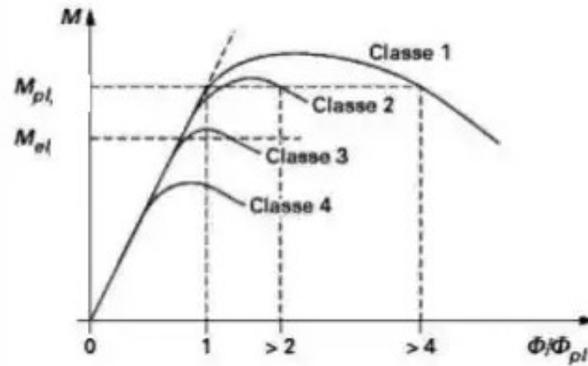
- « Classification de section » : vous pouvez choisir entre un calcul de classification « Par le programme », ou bien vous pouvez outrepasser ce calcul et imposer une classe 1, 2 ou 3. Comme la classe 4 n'est pas décrite pour toutes les sections dans l'Eurocode, on ne peut pas choisir cette option.
- « Vérification élastique » : vous pouvez choisir d'effectuer un calcul en élasticité uniquement. Cela correspond à la classe 3.

La classification des sections est effectuée selon l'EN 1993-1-1, art 5.5.

Quatre classes de sections sont définies :

- Classe 1 (EC3, NEN) ou section PL-PL (DIN)
Ces sections peuvent former une rotule plastique avec la capacité de rotation requise pour l'analyse plastique.
- Classe 2 (EC3, NEN) ou section PL-PL (DIN)
Ces sections peuvent développer leur résistance de moment plastique, mais ont une capacité de rotation limitée.
- Classe 3 (EC3, NEN) ou section PL-PL (DIN)
La contrainte calculée de ces sections dans la fibre la plus comprimée de l'élément métallique peut atteindre sa résistance élastique, mais le voilement / flambement local est susceptible d'empêcher le développement de la résistance du moment plastique.
- Classe 4 (EC3, NEN) ou section limitée
Il est nécessaire de quantifier les effets du voilement / flambement local pour la détermination de la résistance des moments ou la résistance en compression.

CLASSE	MODELE DE COMPORTEMENT	RESISTANCE DE CALCUL	CAPACITE DE ROTATION PLASTIQUE
1		PLASTIQUE sur section complète 	Importante
2		PLASTIQUE sur section complète 	Limitée
3		ELASTIQUE sur section complète 	Aucune
4		ELASTIQUE sur section efficace 	Aucune



Cette classification dépend des proportions de chacun des éléments en compression.

Pour chaque section intermédiaire, la classification est déterminée et le contrôle en section est effectué en conséquence. La classification peut changer pour chaque point intermédiaire.

Pour chaque cas de charge / combinaison, la classification de la section critique est utilisée sur tout l'élément pour effectuer le contrôle en stabilité. Donc, la classification des sections en stabilité peut changer pour chaque cas de charge / combinaison.

Cela dit, pour les sections non-prismatiques, la classification des sections en stabilité est déterminée pour chaque section intermédiaire.

Le contrôle de classification dans SCIA Engineer sera effectué selon les tableaux 5.2 de l'EN 1993-1-1.

Pour les sections standards, la classification est faite en fonction des différentes parties de la « forme initiale ».

- Les éléments comprimés internes sont classifiés selon le tableau 5.2 feuille 1.
- Les éléments comprimés en console (SO & UO) sont classifiés selon le tableau 5.2 feuille 2.
- Les sections circulaires creuses (CHS) sont classifiées selon le tableau 5.2 feuille 3.
- Les cornières sont classifiées selon le tableau 5.2 feuille 2 et aussi feuille 3 en cas de compression uniforme.

Note : les sections sans forme initiale sont classifiées en élastique de classe 3.

Tableau 5.2 — Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées (Feuille 1 sur 3)

Parois comprimées internes						
Classe	Paroi fléchie	Paroi comprimée		Paroi fléchie et comprimée		
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$		lorsque $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ lorsque $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$		
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$		lorsque $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ lorsque $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$		
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$		lorsque $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ lorsque $\psi \leq -1$ *) : $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$		
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ s'applique soit lorsque la contrainte de compression $\sigma \leq f_y$, soit lorsque la déformation de traction $\varepsilon_y > f_y/E$.

Tableau 5.2 — Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées (Feuille 2 sur 3)

Semelles en console						
Classe	Paroi comprimée	Paroi fléchie et comprimée				
		Extrémité comprimée		Extrémité tendue		
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_{\alpha}}$ Pour k_{α} , voir l'EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Tableau 5.2 — Rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois comprimées (Feuille 3 sur 3)

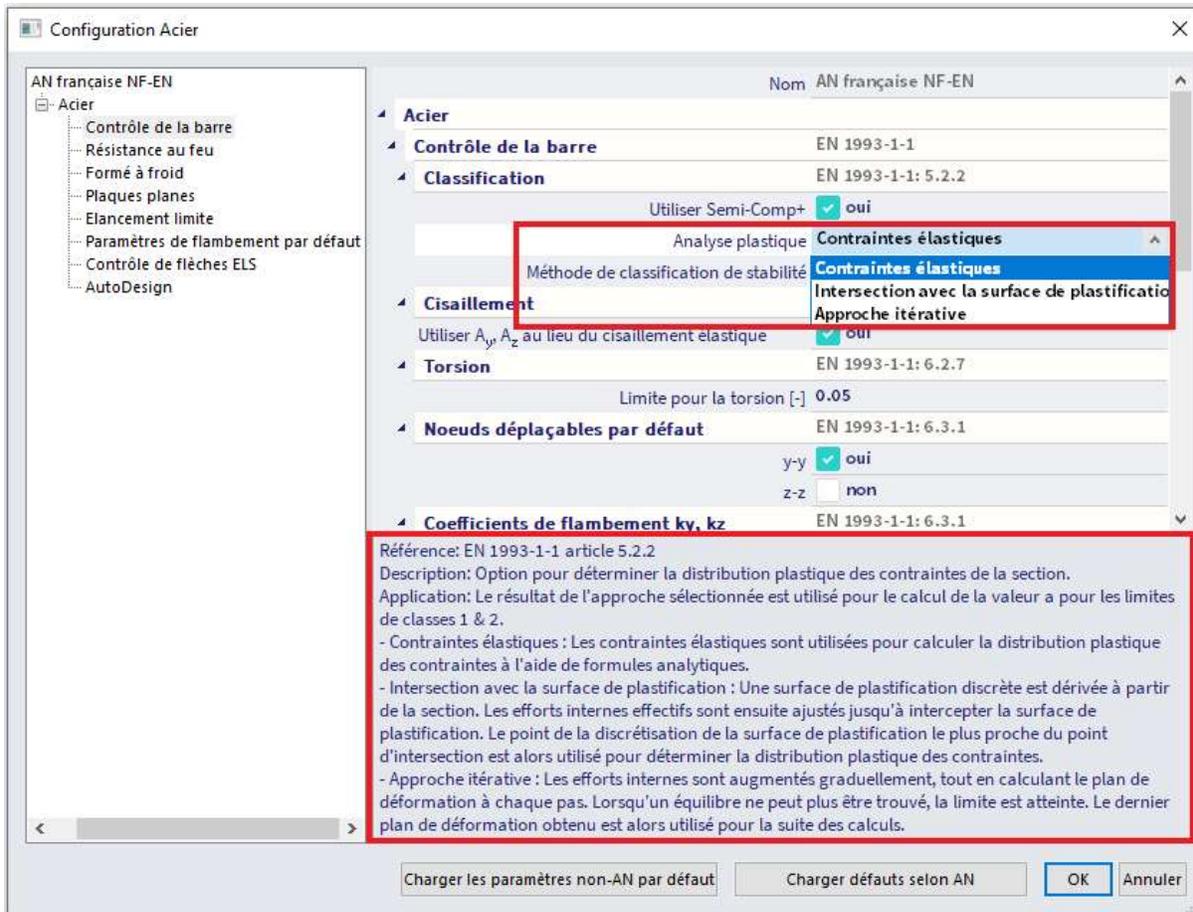
Cornières						
Consulter également «Semelles en console» (voir feuille 2 sur 3)					Ne s'applique pas aux cornières en contact continu avec d'autres composants	
Classe	Section comprimée					
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$h/t \leq 15\epsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$					
Sections tubulaires						
Classe	Section fléchie et/ou comprimée					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
NOTE : Pour $d/t > 90\epsilon^2$, voir l'EN 1993-1-6.						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Comme déjà mentionné, depuis SCIA Engineer 17.0, un nouvel outil de classification est utilisé basé sur la forme initiale de la section.

Vous avez le choix entre trois méthodes pour déterminer la distribution de la contrainte plastique dans la section :

- Contraintes élastiques
- Intersection avec la surface de plastification
- Approche itérative

Dans les propriétés de la section, vous pouvez choisir la méthode d'analyse plastique. Toutefois, cela n'est qu'à titre informatif et ce choix n'est pas décisif. La méthode qui sera utilisée pour effectuer le contrôle acier peut être choisie dans la fenêtre de « Configuration Acier » :



3.2.1. Contraintes élastiques

La méthode des contraintes élastiques est une approche rapide qui utilise des formules fixes. Dans cette méthode, la distribution de la contrainte plastique est basée sur les contraintes élastiques f_1 et f_2 aux extrémités des éléments.

- **Calcul standard de α**

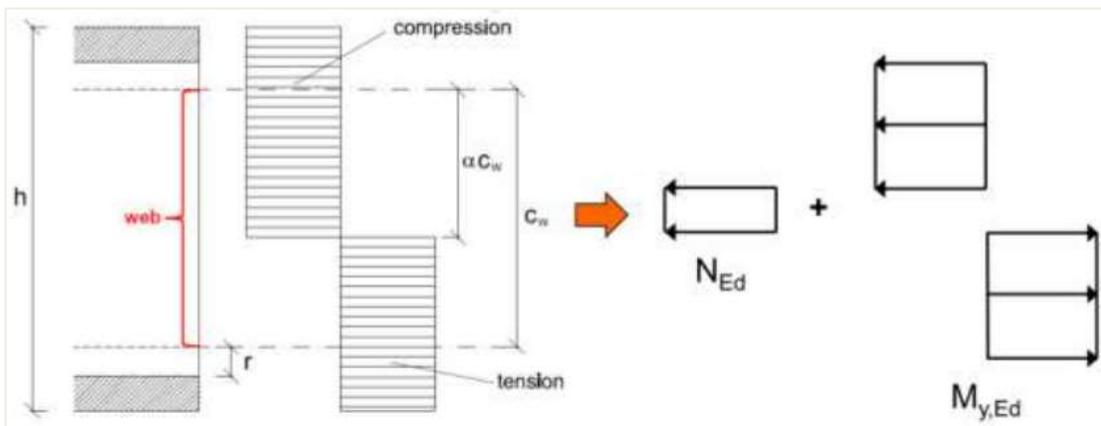
Dans le cas où une contrainte est positive (compression) et l'autre est négative (traction), le calcul suivante est utilisé :

$$\alpha = \frac{|\text{compression}|}{|\text{compression}| + |\text{traction}|}$$

Dans tous les autres cas, α est pris égal à 1,00.

- **Section en I doublement symétrique**

Particulièrement pour les sections en I doublement symétriques, la valeur de α de l'âme est limitée par la formule suivante (Ref. [36]) :



Seul M_y augmente :

$$\alpha = \frac{1}{c_w} \cdot \left(\frac{h}{2} + \frac{N_{Ed}}{2 \cdot t_w \cdot f_y} - (t_f + r) \right)$$

Dans cette formule, N_{Ed} est pris positif pour la compression et négatif pour la traction.

Ci-dessous on visualise la sortie pour une section HEA450 :

Classification
✕

EFFORTS INTERNES

N.Ed -5.00 kN

Mv.Ed 20.00 kNm

Mz.Ed 0.00 kNm

DONNÉES MATÉRIALES

f_v 235000.000 kN/m²

E 2.1000e+05 MPa

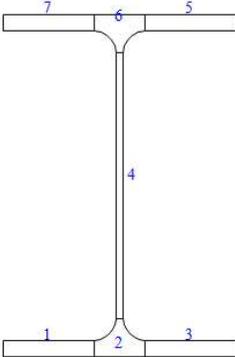
ϵ 1.00 -

Analyse plastique Contraintes élastiques ▾

Classification pour la conception au feu

Semi-Comp+ limites

M-à-jour



Classification selon EN 1993-1-1 article 5.5.2
 Classification des parties internes et libres selon EN 1993-1-1 Tableau 5.2 page 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	$k\alpha$ [-]	α [-]	c/t [-]	Limite classe 1 [-]	Limite de Classe 2 [-]	Limite de Classe 3 [-]	Classe
1	SO	117	21	-6293.591	-6293.591								
3	SO	117	21	-6293.591	-6293.591								
4	I	344	12	-5116.789	5678.407	-0.9	0.5	29.9	71.5	82.4	112.7	1	
5	SO	117	21	6855.209	6855.209	1.0	0.4	1.0	5.6	9.0	10.0	14.0	1
7	SO	117	21	6855.209	6855.209	1.0	0.4	1.0	5.6	9.0	10.0	14.0	1

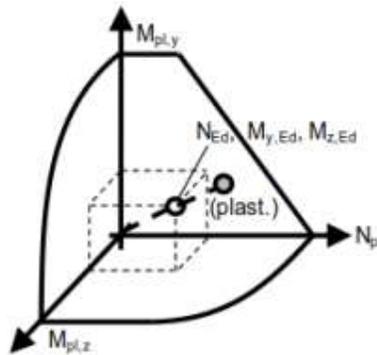
La section est classée en Classe 1

Tâches Largeur de page

Durée du calcul de classification 00,000 sec OK

3.2.2. Intersection avec la surface de plastification

Par cette méthode, une analyse plastique complète est effectuée. Cette analyse plastique est basée sur la forme initiale et utilise un diagramme contrainte-déformation avec un plateau élastique.



Cette surface élastique est générée pour la section donnée, et l'intersection entre cette surface et les efforts en cours est déterminée.

Le point d'intersection (gris) ne coïncide pas toujours avec un point prédéterminé de la surface, donc de petites déviations peuvent survenir. A partir de l'emplacement de l'axe neutre plastique, qui résulte de cette analyse, la valeur de α pour les différentes parties peut être déterminée.

Classification

EFFORTS INTERNES

N.Ed -5.00 kN
Mv.Ed 20.00 kNm
Mz.Ed 0.00 kNm

DONNÉES MATÉRIEAUX

fv 235000.000 kN/m²
E 2.1000e+05 MPa
ε 1.00 -

Analyse plastique Intersection avec la sur...
 Classification pour la conception au feu
 Semi-Comp+ limites
M-à-jour

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ1 [kN/m ²]	σ2 [kN/m ²]	ψ [-]	ko [-]	α [-]	c/t [-]	Limite classe 1 [-]	Limite de Classe 2 [-]	Limite de Classe 3 [-]	Classe
1	SO	117	21	-6293.591	-6293.591								
3	SO	117	21	-6293.591	-6293.591								
4	I	344	12	-5116.789	5678.407	-0.9	0.6	29.9	58.1	66.9	112.7	1	
5	SO	117	21	6855.209	6855.209	1.0	0.4	1.0	5.6	9.0	10.0	14.0	1
7	SO	117	21	6855.209	6855.209	1.0	0.4	1.0	5.6	9.0	10.0	14.0	1

Note: Pour les limites des classes 1 & 2 une analyse plastique avancée (intersection avec la surface de plastification) a été utilisée. La section est classée en Classe 1

Info calcul

N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
-188.52	752.96	0.00

Tâches | Largeur de page | OK

Durée du calcul de classification 00,076 sec

Note : il peut arriver que l'axe neutre plastique soit tourné, mais cela a un impact négligeable sur α . Cela arrive lorsque le point le plus près de la surface élastique a un petit moment Mz .

3.2.3. Approche itérative

Pour cette méthode aussi, une analyse plastique complète est effectuée. Cette analyse plastique est basée sur la forme initiale et utilise un diagramme de contrainte-déformation avec un plateau élastique.

Le plan de déformation pour les efforts internes donnés est déterminé de manière itérative, ce qui donne une solution exacte.

Classification
✕

EFFORTS INTERNES

N.Ed -5.00 kN

Mv.Ed 20.00 kNm

Mz.Ed 0.00 kNm

DONNÉES MATÉRIELLES

f_v 235000.000 kN/m²

E 2.1000e+05 MPa

ϵ 1.00 -

Analyse plastique Approche itérative ▾

Classification pour la conception au feu

Semi-Comp+ limites

M-à-jour

Classification selon EN 1993-1-1 article 5.5.2
Classification des parties internes et libres selon EN 1993-1-1 Tableau 5.2 page 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	$k\sigma$ [-]	α [-]	c/t [-]	Limite classe 1 [-]	Limite de Classe 2 [-]	Limite de Classe 3 [-]	Classe
1	SO	117	21	-6293.591	-6293.591								
3	SO	117	21	-6293.591	-6293.591								
4	I	344	12	-5116.789	5678.407	-0.9		0.6	29.9	58.2	67.0	112.7	1
5	SO	117	21	6855.209	6855.209	1.0	0.4	1.0	5.6	9.0	10.0	14.0	1
7	SO	117	21	6855.209	6855.209	1.0	0.4	1.0	5.6	9.0	10.0	14.0	1

Note: Pour les limites des classes 1 & 2 une analyse plastique avancée (approche itérative) a été utilisée.
La section est classée en Classe 1

Info calcul

N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
-187.02	748.09	0.00

Tâches Largeur de page

Durée du calcul de classification 00,976 sec OK

3.2.4. Semi-Comp+

Un autre développement, disponible depuis SCIA Engineer 17.0, est la classification des sections en acier semi-compactes. Ces sections sont des sections de classe 3.

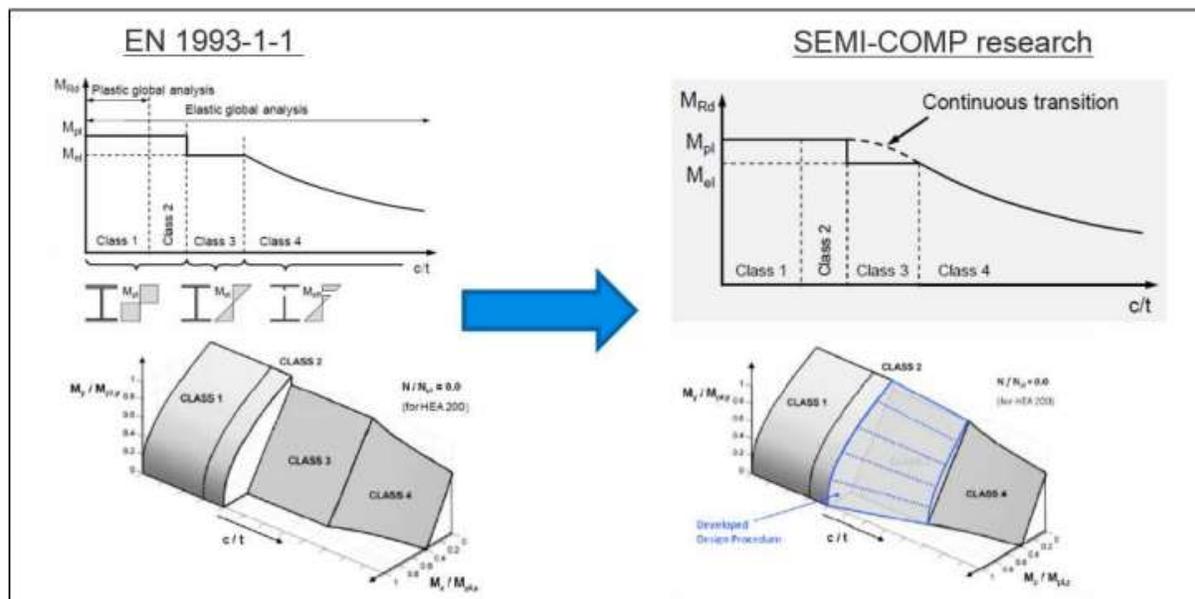
L'option Semi-Comp+ peut être activée dans la « Configuration Acier » :

Limite entre les classes 2 et 3 :			
Partie interne en compression en traction	0,6	34,11	38
	0,6	83,38	83
Aile en console en compression	0,6	11,18	10
Limite entre les classes 1 et 2 :			
Partie interne en compression en traction	0,5	28,43	33
	0,5	69,48	72
Aile en console en compression	0,5	9,32	9
	*) précédemment	0,74	42,07
			42

Note : ces adaptations des limites de classes seront implémentées dans la prochaine itération de l'EN 1993-1-1.

▪ **Interpolation du module de section**

Le module de section sera interpolé entre les valeurs élastiques et plastiques. Cela a pour avantage que la capacité plastique de la section est prise en compte pour les sections de classe 3.



3.2.5. Section effective

Si la classification aboutit à un profil de classe 4, la section effective sera calculée selon l'EN 1993-1-5. Pour chaque cas de charge et combinaison, les propriétés de la section effective la plus critique seront sauvegardés :

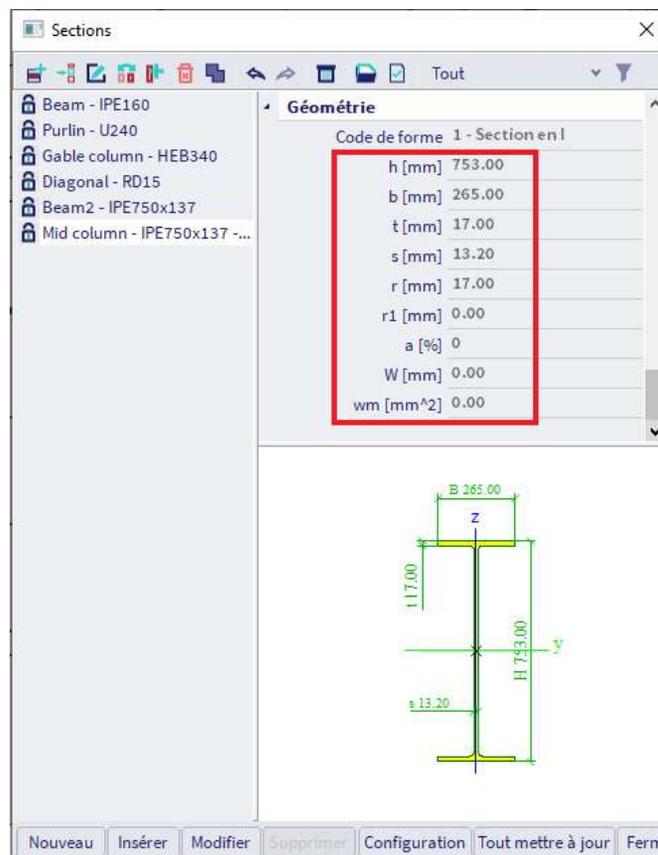
- A_{eff} est la section effective de la section lorsque celle-ci est soumise à de la compression uniforme.
- W_{eff} est le module de section effectif de la section lorsque celle-ci est soumise uniquement à un moment sur l'axe concerné
- e_N est le décalage du centre de gravité concerné lorsque la section est soumise à une compression uniforme.

Avec ces propriétés critiques, le contrôle acier sera effectué.

Exemple : Industrial Hall.esa

Dans cet exemple, la classification sera faire pour un profilé IPE750x134, de section de classe 4. Après cela, le calcul de la forme effective selon l'EN 1993-1-5 sera donné.

Prenons pour exemple l'élément poteau B28 :

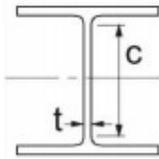


La classification a été effectuée en bas du poteau (position = 0,00m).

A cet endroit, un appui articulé a été généré, donc à cet endroit précis, le poteau n'est pas soumis à de la flexion.

A partir du tableau 5.2 de l'EN 1993-1-1, nous pouvons déterminer la classe pour chaque composant de la section.

Ame selon le tableau 5.2 (feuille 1) :



$$c = H - 2 * \text{épaisseur des ailes} - 2 * \text{rayon}$$

$$c = 753\text{mm} - (2*17\text{mm}) - (2*17\text{mm}) = 685\text{mm}$$

$$t = 13,20\text{mm}$$

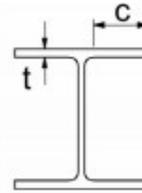
$$c/t = \mathbf{51,89}$$

Classe	Paroi fêlée	Paroi comprimée
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)		
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)		
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$

$$\text{Avec } \varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1$$

Ratio maximal pour la classe 1 : 33
 Ratio maximal pour la classe 2 : 38
 Ratio maximal pour la classe 3 : 42
 => $c/t = 51,89 \Rightarrow$ classe 4

Aile selon le tableau 5.2 (feuille 2) :



$$c = B/2 - (\text{épaisseur de l'âme}) / 2 - \text{rayon}$$

$$c = (265\text{mm} / 2) - (13,20\text{mm} / 2) - 17 = 108,9\text{mm}$$

$$t = 17\text{mm}$$

$$c/t = \mathbf{6,40}$$

Classe	Paroi comprimée
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)	
1	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)	
3	$c/t \leq 14\varepsilon$

$$\text{Avec } \varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1$$

Ratio maximal pour la classe 1 : 9
 Ratio maximal pour la classe 2 : 10
 Ratio maximal pour la classe 3 : 14
 => $c/t = 6,40 < 9 \Rightarrow$ classe 1

Cela correspond à la classification de cette section pour le contrôle en stabilité dans SCIA Engineer :

...:CONTRÔLE DE STABILITÉ:...

Classification pour le contrôle de stabilité

Position déterminante pour la classification pour la stabilité : 0.000 m

Classification selon EN 1993-1-1 article 5.5.2

Classification des parties internes et libres selon EN 1993-1-1 Tableau 5.2 page 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_{σ} [-]	α [-]	c/t [-]	Limite classe 1 [-]	Limite de Classe 2 [-]	Limite de Classe 3 [-]	Classe
1	SO	108.90	17.00	2185.676	2185.676	1.0	0.4	1.0	6.4	9.0	10.0	14.0	1
3	SO	108.90	17.00	2185.676	2185.676	1.0	0.4	1.0	6.4	9.0	10.0	14.0	1
4	I	685.00	13.20	2185.676	2185.676	1.0		1.0	51.9	33.0	38.0	42.0	4
5	SO	108.90	17.00	2185.676	2185.676	1.0	0.4	1.0	6.4	9.0	10.0	14.0	1
7	SO	108.90	17.00	2185.676	2185.676	1.0	0.4	1.0	6.4	9.0	10.0	14.0	1

La section est classée en **Classe 4**

Cette section est de classe 4 pour la classification en stabilité, donc les propriétés effectives doivent être calculées.

Ces propriétés sont également données dans SCIA Engineer dans l'aperçu du contrôle acier, sous le calcul de classification.

Propriétés effectives						
Aire effective	A _{eff}	1.7222e+04	mm ²			
Moment d'inertie effectif de la section	I _{eff,y}	1.6608e+09	mm ⁴	I _{eff,z}	5.2895e+07	mm ⁴
Module de section efficace	W _{eff,y}	4.4111e+06	mm ³	W _{eff,z}	3.9920e+05	mm ³
Décalage du centre de gravité	e _{N,y}	0.00	mm	e _{N,z}	0.00	mm

Le calcul de la section efficace A_{eff} est donné ci-dessous.

Dans cette section, l'âme est soumise à un effort uniforme de compression.

Le calcul de la section efficace sera effectué selon l'EN 1993-1-5 :2006, tableau 4.1 et l'EN 1993-1-5 :2006/AC :2009 article 9. Dans le tableau 4, on utilisera la situation de compression uniforme pour cet exemple :

Stress distribution (compression positive)				Effective ^p width b _{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Buckling factor k _σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Pour $\psi = 1$ et les éléments comprimés internes :

$$\bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,673 \rightarrow \rho = 1$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,673 \rightarrow \rho = (\bar{\lambda}_p - 0,22) / \bar{\lambda}_p^2$$

Pour notre section :

$$\bar{\lambda}_p = [f_y / \alpha_{cr}]^{0,5} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{51,89}{28,4 \cdot 1,00 \cdot \sqrt{4,0}} = 0,91$$

Avec :

$$\varepsilon = 1,00 \text{ (S235)}$$

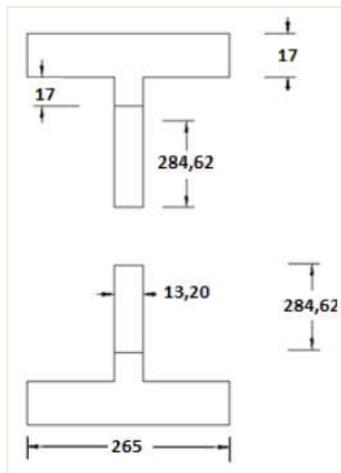
$$k_\sigma = 4,0 \text{ (tableau 4.1 de l'EN 1993 - 1 - 5:2006)}$$

Donc :

$$\rho = \frac{0,91 - 0,22}{(0,91)^2} = 0,83$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot \rho \cdot \bar{b} = 0,5 \cdot 0,83 \cdot 685 \text{ mm} = 284,62 \text{ mm}$$

$$A_{eff} = [265 \cdot 17 + 284,62 \cdot 13,20 + 17 \cdot 13,20] \cdot 2 = 16972,77 \text{ mm}^2$$



Dans ce calcul, les arrondis aux coins entre les ailes et l'âme ne sont pas pris en compte. C'est pourquoi les résultats dans SCIA Engineer sont légèrement plus élevés :

Propriétés effectives						
Aire effective	A _{eff}	1.7222e+04	mm ²			
Moment d'inertie effectif de la section	I _{eff,y}	1.6608e+09	mm ⁴	I _{eff,z}	5.2895e+07	mm ⁴
Module de section efficace	W _{eff,y}	4.4111e+06	mm ³	W _{eff,z}	3.9920e+05	mm ³
Décalage du centre de gravité	e _{N,y}	0.00	mm	e _{N,z}	0.00	mm

Les autres propriétés de cette section effective peuvent également être calculées.

Note : pour les sections formées à froid, les règles sont adaptées (selon l'EN 1993-1-3).

Chapitre 4: Contrôle des sections ELU

Dans ce chapitre, sont détaillés tout d'abord les coefficients partiels de sécurité, puis une explication rapide de tous les contrôles de section sera donnée.

Le contrôle en section se trouve dans SCIA Engineer dans le processus Acier puis « Contrôle ELU de l'acier ». Dans les propriétés du contrôle, vous pouvez choisir de regarder la sortie brève, synthétique ou détaillée :

- Avec la sortie brève, les résultats sont présentés en une seule ligne.
- Avec la sortie synthétique, les résultats de tous les contrôles unité sont présentés en une page.
- Avec la sortie détaillée, les résultats de tous les contrôles unité sont présentés, avec une référence à la formule utilisée de l'EN 1993-1-1 pour chaque contrôle. Depuis SCIA 18.0, toutes les formules peuvent être visibles dans la sortie.

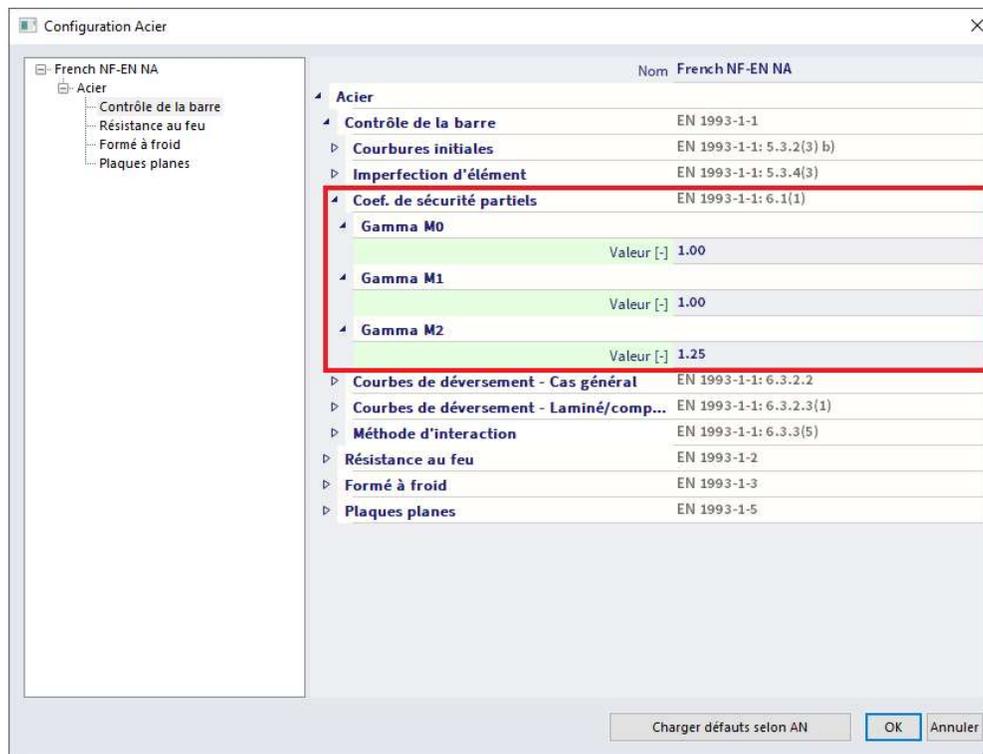
Plus loin dans ce chapitre, les contrôles en section seront explicités et les résultats détaillés seront présentés.

4.1. Coefficients partiels de sécurité

Les coefficients partiels de sécurité proviennent de l'EN 1993-1-1 article 6.1.

Les coefficients suivants sont pris en compte :

- $\gamma_{M0} = 1,00$: résistance des sections
- $\gamma_{M1} = 1,00$: résistance des barres aux instabilités, évaluée par vérifications de barres
- $\gamma_{M2} = 1,25$: résistance à la rupture des sections en traction



4.2. Traction

Le contrôle en traction sera effectué selon l'EN 1993-1-1 art. 6.2.3 formule (6.5) :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

Avec :

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{la résistance plastique de calcul de la section}$$

Exemple : Industrial Hall.esa

Prenons pour exemple l'élément de contreventement B234 (pour le cas de charge 3DWind1). Dans ce cas de charges, le contreventement travaille en traction :

Efforts internes		Calculé	Unité
Effort normal	N_{Ed}	29.28	kN
Effort tranchant	$V_{y,Ed}$	0.00	kN
Effort tranchant	$V_{z,Ed}$	0.00	kN
Torsion	T_{Ed}	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{y,Ed}$	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{z,Ed}$	0.00	kNm

Classification pour le contrôle en section

Avertissement: Classification non supportée pour ce type de section.
La section est vérifiée élastiquement en classe 3.

Contrôle traction

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.3 et formule (6.5)

Aire de la section	A	1.7663e+02	mm ²
Résistance plastique en traction	$N_{pl,Rd}$	41.51	kN
Résistance ultime en traction	$N_{u,Rd}$	45.78	kN
Résistance en traction	$N_{t,Rd}$	41.51	kN
Contrôle unité		0.71	-

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.7663 \cdot 10^2 [\text{mm}^2] \times 235.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 41.51 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.6})$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 \times A \times f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 1.7663 \cdot 10^2 [\text{mm}^2] \times 360.0 [\text{MPa}]}{1.25} = 45.78 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.7})$$

$$N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd}, N_{u,Rd}) = \min(41.51 [\text{kN}], 45.78 [\text{kN}]) = 41.51 [\text{kN}]$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{29.28 [\text{kN}]}{41.51 [\text{kN}]} = \mathbf{0.71} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.5})$$

L'élément satisfait le contrôle en section.

4.3. Compression

Le contrôle en compression sera effectué selon l'EN 1993-1-1 art. 6.2.4 formule (6.9) :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

Avec :

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{pour les sections de classe 1, 2 ou 3}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{pour les sections de classe 4}$$

Exemple : Industrial Hall.esa

Prenons pour exemple l'élément poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

La position du contrôle critique est 1.150 m

Efforts internes		Calculé	Unité
Effort normal	N_{Ed}	-160.67	kN
Effort tranchant	$V_{y,Ed}$	-0.05	kN
Effort tranchant	$V_{z,Ed}$	-101.75	kN
Torsion	T_{Ed}	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{y,Ed}$	-117.05	kNm
Moment de flexion	$M_{z,Ed}$	-0.06	kNm

La classe pour cette position est la classe 1 (poteau sous compression et flexion).

Contrôle compression

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.4 et formule (6.9)

Aire de la section	A	1.8753e+04	mm ²
Résistance à la compression	$N_{c,Rd}$	4407.07	kN
Contrôle unité		0.04	-

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.8753 \cdot 10^4 [\text{mm}^2] \times 235.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 4407.07 [\text{kN}]$$

(EC3-1-1: 6.10)

$$\text{Contrôle unité} = \frac{|N_{Ed}|}{N_{c,Rd}} = \frac{|-160.67 [\text{kN}]|}{4407.07 [\text{kN}]} = 0.04 \leq 1.00$$

(EC3-1-1: 6.9)

4.4. Moment fléchissant

Le contrôle en moment fléchissant M_y et M_z sera effectué selon l'EN 1993-1-1 art. 6.2.5 formule (6.12) :

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

Avec :

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{pour les sections de classe 1 ou 2}$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{pour les sections de classe 3}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{pour les sections de classe 4}$$

Note : un module de section interpolé peut être utilisé en cas de sections de classe 3, lorsque la méthode Semi-Comp+ est activée.

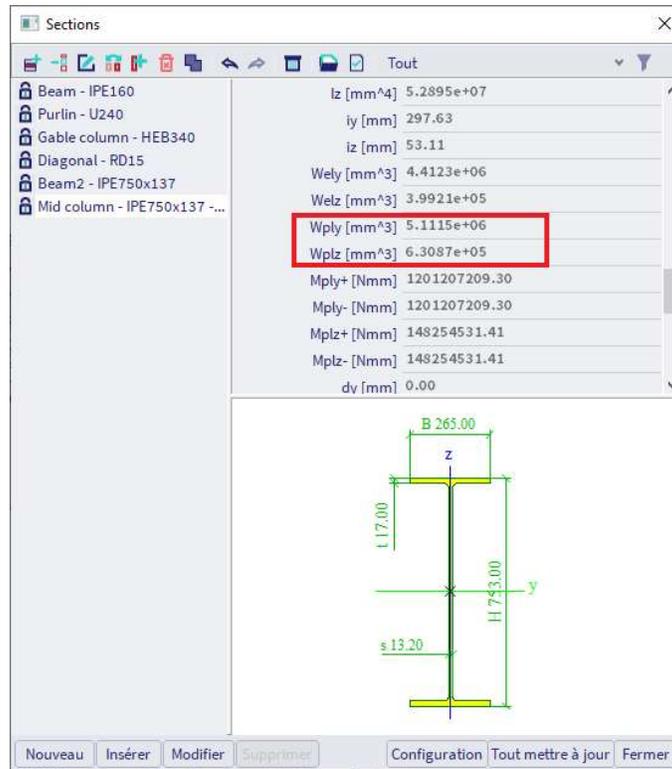
Exemple : Industrial Hall.esa

Prenons pour exemple l'élément poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

La position du contrôle critique est 1.150 m

Efforts internes		Calculé	Unité
Effort normal	N _{Ed}	-160.67	kN
Effort tranchant	V _{y,Ed}	-0.05	kN
Effort tranchant	V _{z,Ed}	-101.75	kN
Torsion	T _{Ed}	0.00	kNm
Moment de flexion	M _{y,Ed}	-117.05	kNm
Moment de flexion	M _{z,Ed}	-0.06	kNm

La classe pour cette position est la classe 1 (poteau sous compression et flexion).



Contrôle du moment de flexion pour M_y
 Selon EN 1993-1-1 article 6.2.5 et formule (6.12),(6.13)

Module de section plastique	W _{pl,y}	5.1115e+06	mm ³
Moment de flexion plastique	M _{pl,y,Rd}	1201.21	kNm
Contrôle unité		0.10	-

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5.1115 \cdot 10^6 [\text{mm}^3] \times 235.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 1201.21 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.13})$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{|M_{y,Ed}|}{M_{pl,y,Rd}} = \frac{|-117.05 [\text{kNm}]|}{1201.21 [\text{kNm}]} = 0.10 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

Contrôle du moment de flexion pour M_z
 Selon EN 1993-1-1 article 6.2.5 et formule (6.12),(6.13)

Module de section plastique	W _{pl,z}	6.3087e+05	mm ³
Moment de flexion plastique	M _{pl,z,Rd}	148.25	kNm
Contrôle unité		0.00	-

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6.3087 \cdot 10^5 [\text{mm}^3] \times 235.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 148.25 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.13})$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{|M_{z,Ed}|}{M_{pl,z,Rd}} = \frac{|-0.06 [\text{kNm}]|}{148.25 [\text{kNm}]} = 0.00 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

4.5. Cisaillement

Le contrôle en cisaillement V_y et V_z sera effectué selon l'EN 1993-1-1 art. 6.2.6 formule (6.17) :

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

En calcul plastique, $V_{c,Rd}$ (en l'absence de torsion) est la résistance de cisaillement plastique $V_{pl,Rd}$, selon la formule (6.18) :

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

Avec A_v l'aire de cisaillement, la formule pour A_v dépend de la section (cf EN 1993-1-1 article 6.2.6(3) et publications de l'ECCS, cf annexe A).

En calcul élastique, $V_{c,Rd}$ est la résistance élastique de cisaillement. Le critère suivant, pour un point critique de la section, peut être utilisé (formule (6.19)) à moins que la vérification au flambement en section 5 de l'EN 1993-1-5 ne l'applique :

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y \cdot (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})} \leq 1$$

Avec la formule 6.20) :

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I_t}$$

Lorsque l'effort de cisaillement est combiné avec un moment de torsion, la résistance plastique $V_{pl,Rd}$ doit être réduit comme décrit dans le paragraphe suivant.

Exemple : Industrial Hall.esa

Prenons pour exemple l'élément poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

La position du contrôle critique est 1.150 m

Efforts internes		Calculé	Unité
Effort normal	N_{Ed}	-160.67	kN
Effort tranchant	$V_{y,Ed}$	-0.05	kN
Effort tranchant	$V_{z,Ed}$	-101.75	kN
Torsion	T_{Ed}	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{y,Ed}$	-117.05	kNm
Moment de flexion	$M_{z,Ed}$	-0.06	kNm

La classe pour cette position est la classe 1 (poteau sous compression et flexion).

Contrôle à l'effort tranchant pour V_y

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.6 et formule (6.17)

Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Aire de cisaillement	A_v	9,4086e+03	mm ²
Résistance plastique à l'effort tranchant pour V_y	$V_{pl,y,Rd}$	1276.54	kN
Contrôle unité		0.00	-

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{9.4086 \cdot 10^3 [\text{mm}^2] \times \frac{235.0 [\text{MPa}]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 1276.54 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.18})$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{|V_{y,Ed}|}{V_{c,y,Rd}} = \frac{|-0.05 [\text{kN}]|}{1276.54 [\text{kN}]} = \mathbf{0.00 \leq 1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.17})$$

Contrôle à l'effort tranchant pour V_z

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.6 et formule (6.17)

Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Aire de cisaillement	A_v	1,1389e+04	mm ²
Résistance plastique à l'effort tranchant pour V_z	$V_{pl,z,Rd}$	1545.22	kN
Contrôle unité		0.07	-

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1.1389 \cdot 10^4 [\text{mm}^2] \times \frac{235.0 [\text{MPa}]}{\sqrt{3}}}{1.00} = 1545.22 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.18})$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{|V_{z,Ed}|}{V_{c,z,Rd}} = \frac{|-101.75 [\text{kN}]|}{1545.22 [\text{kN}]} = \mathbf{0.07 \leq 1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.17})$$

4.6. Torsion

Le contrôle en torsion sera effectué selon l'EN 1993-1-1 art. 6.2.7 formule (6.23) :

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1$$

Où T_{Rd} est la résistance de calcul en torsion de la section.

Le moment de torsion total T_{Ed} doit être pris en compte comme la somme de deux efforts internes (formule (6.24)) :

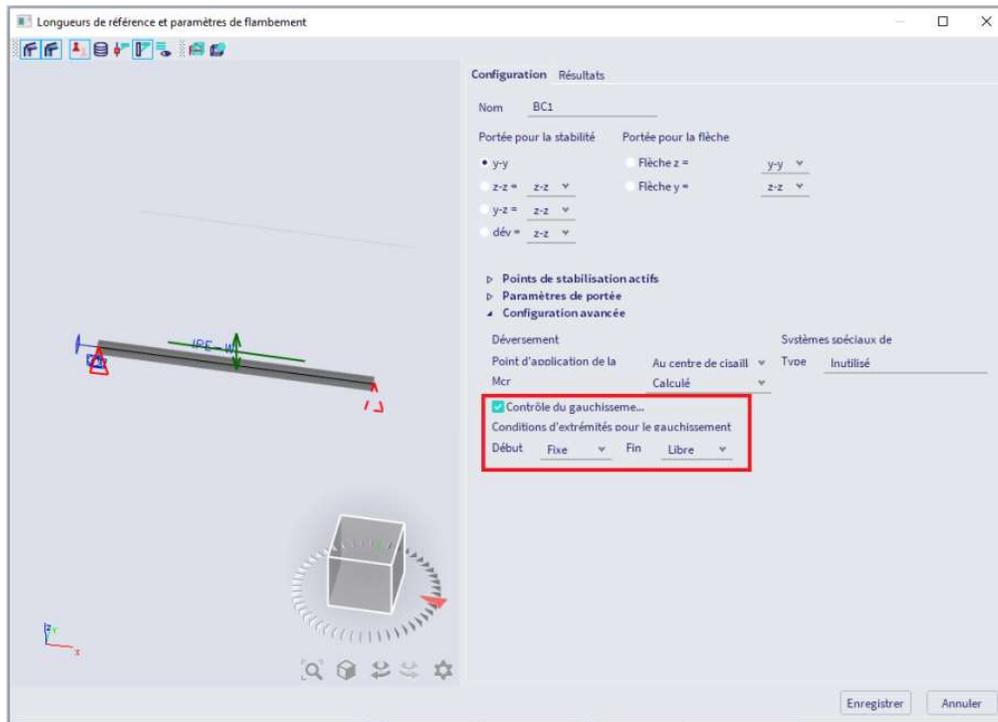
$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed}$$

Avec:

$T_{t,Ed}$: la torsion interne de St Venant

$T_{w,Ed}$: la torsion interne de gauchissement

SCIA Engineer prendra en compte automatiquement la torsion de St Venant. Si vous souhaitez également prendre en compte la torsion de gauchissement, il vous faut activer l'option dans les « Longueurs de référence et paramètres de flambement » de cet élément :



Lorsque l'option « Contrôle du gauchissement » est activée, vous devez indiquer pour le début et pour la fin de l'élément s'il est « libre » ou « fixe » pour le gauchissement (vous pouvez afficher l'axe local de cet élément pour visualiser son début et sa fin).

Exemple : [Warping.esa](#)

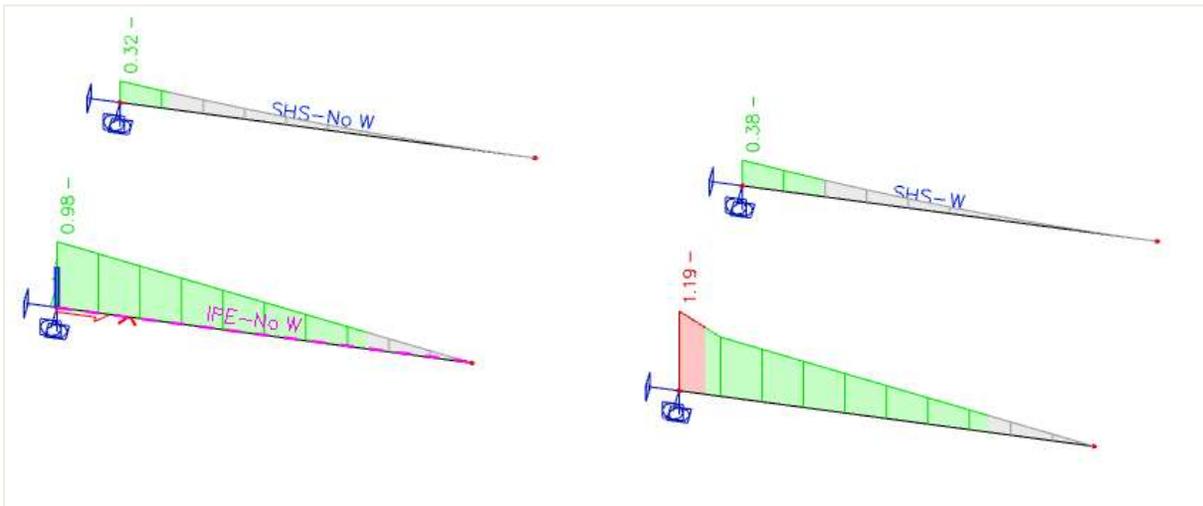
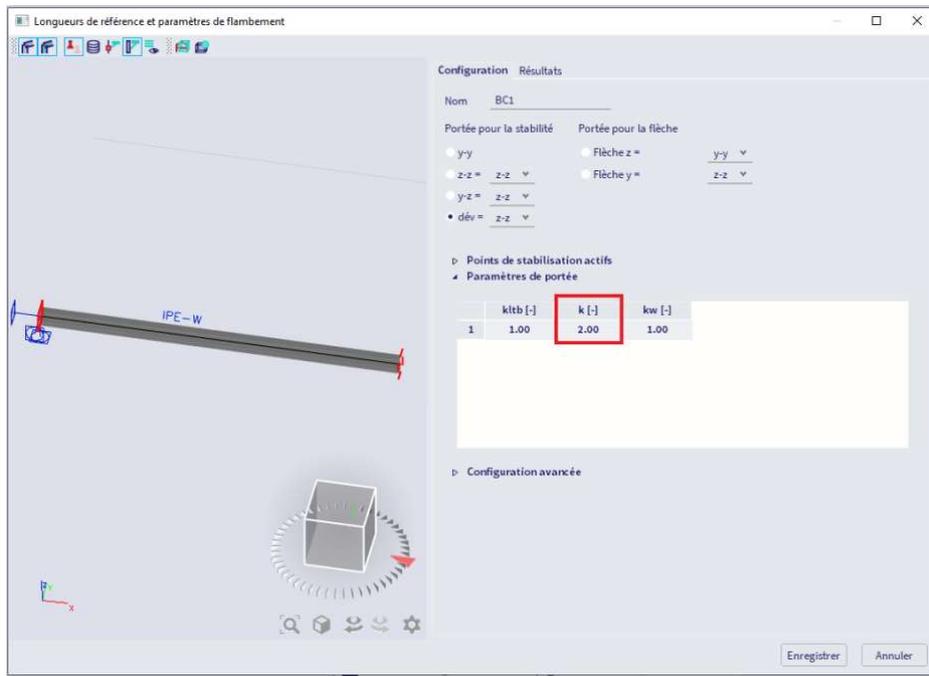
Comme cité dans l'EN 1993-1-1, art. 6.2.7 (7), pour les sections creuses fermées, les effets de torsion de gauchissement peuvent être négligeables, et dans le cas d'un élément avec une section ouverte, comme un I ou un H, on peut supposer que les effets de la torsion de St Venant seront négligeables également. Cet article est une simplification et est valable dans SCIA Engineer depuis la version 16.0.

Depuis SCIA Engineer 17.0, le contrôle du gauchissement sera également effectué pour les sections creuses fermées, même s'ils n'auront pas le même impact que pour des profilés ouverts.

Dans cet exemple, 4 poutres ont été saisies :

- IPE180 – le contrôle du gauchissement n'a pas été activé.
- SHS180/180/10.0 - le contrôle du gauchissement n'a pas été activé.
- IPE180 – le contrôle du gauchissement a été activé dans les données de flambement.
- SHS180/180/10.0 – le contrôle du gauchissement a été activé dans les données de flambement.

Sur toutes les poutres, un effort linéaire de -4kN a été saisi avec une excentricité e_y de 0,050m. Le coefficient k a été modifié par 2 dans les données de flambement pour chaque groupe (BC1 et BC2) car nous considérons ces éléments en porte à faux.



Pour les profilés SHS, on observe une légère différence entre les options de gauchissement activées ou non. On s'attendait cela dit à ce que le gauchissement n'ait pas une forte influence sur les sections creuses fermées.

Pour les profilés IPE, la torsion de gauchissement ne peut pas être négligée. Lorsque l'option est activée, l'impact sur la résistance en torsion est important.

Contrôle en torsion de l'IPE180 lorsque l'option de gauchissement n'est pas activée :

Contrôle torsion

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.7 et formule (6.23)

Indice de fibre	Fibre	2	
Moment de torsion total	T_{Ed}	133.6	MPa
Résistance élastique à l'effort tranchant	T_{Rd}	135.7	MPa
Contrôle unité		0.98	-

Contrôle combiné effort tranchant et torsion pour V_z et $\tau_{t,Ed}$

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.6 & 6.2.7 et formule (6.25),(6.26)

Résistance plastique au cisaillement pour V_z et T_{Ed}	$V_{pl,T,z,Rd}$	70.02	kN
Contrôle unité		0.23	-

Contrôle en torsion de l'IPE180 lorsque l'option de gauchissement est activée :

Contrôle torsion

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.7 et formule (6.23)

Indice de fibre	Fibre	2	
Moment de torsion total	T_{Ed}	133.6	MPa
Résistance élastique à l'effort tranchant	T_{Rd}	135.7	MPa
Contrôle unité		0.98	-

Contrôle combiné effort tranchant et torsion pour V_z et $\tau_{t,Ed}$

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.6 & 6.2.7 et formule (6.25),(6.26)

Fibre		1	
Contrainte de cisaillement due à la torsion uniforme (St. Venant)	$\tau_{t,Ed}$	0.0	MPa
Résistance plastique au cisaillement pour V_z et T_{Ed}	$V_{pl,T,z,Rd}$	152.01	kN
Contrôle unité		0.11	-

Contrôle combiné flexion, effort normal et effort tranchant

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.7

Selon I. Vayas, Stahlbau 69 (2000)

"Interaktion der plastischen Grenzschnittgroessen doppelsymmetrischer I-Querschnitte", Tableau 1.

Conditions de gauchissement aux extrémités de l'élément

Extrémité	Condition
Début	Fixe
Fin	Libre

Décomposition du moment de torsion

x [m]	$M_{xp,Ed}$ [kNm]	$M_{xs,Ed}$ [kNm]	$M_{wy,Ed}$ [kNm ²]
0.000	0.00	0.80	-0.43
0.400	0.29	0.43	-0.19
0.800	0.41	0.23	-0.06
1.200	0.44	0.12	0.00
1.600	0.42	0.06	0.04
2.000	0.37	0.03	0.06
2.000	0.37	0.03	0.06
2.400	0.31	0.01	0.06
2.800	0.25	-0.01	0.06
3.200	0.19	-0.03	0.05
3.600	0.14	-0.06	0.04
4.000	0.12	-0.12	0.00

Efforts internes			
Torsion de St. Venant	$M_{xp,Ed}$	0.00	kNm
Torsion non uniforme	$M_{xs,Ed}$	0.80	kNm
Bi-moment	$M_{wy,Ed}$	-0.43	kNm ²

Ratios d'efforts		
Quotient d'aile de section	α_f	0.61
Quotient d'âme de section	α_w	0.39
Ratio d'effort normal	n	0.00
Ratio de moment pour M_y	m_y	-0.82
Ratio de moment pour M_z	m_z	0.00
Ratio d'effort tranchant pour V_y	v_y	0.00
Ratio d'effort tranchant pour V_z	v_z	0.12
Ratio de moment pour M_w	m_w	0.61
Ratio de moment pour M_{xp}	m_{kp}	0.00
Ratio de moment pour M_{xs}	m_{ks}	0.05

Coefficients d'influence		
Ratio d'interaction pour contraintes de cisaillement dans les ailes	β_y	0.05
Coefficient de réduction pour les contraintes de cisaillement dans les ailes	ρ_f	0.00
Réduction de la limite élastique pour contraintes de cisaillement dans les ailes	s_f	1.00
Ratio d'interaction pour contraintes de cisaillement dans l'âme	β_z	0.12
Coefficient de réduction pour contraintes de cisaillement dans l'âme	ρ_w	0.00
Réduction de la limite élastique pour contraintes de cisaillement dans l'âme	s_w	1.00
Coefficient de moment additionnel	λ_s	0.00
Coefficient de moment additionnel	δ	0.00

Contrôles unité		
Contrôle unité (42)	1.19	-

Comme déjà précisé, depuis la version 17.0 de SCIA Engineer, le même contrôle du gauchissement est effectué pour les profilés creux fermés.

4.7. Contrôle combiné : flexion, cisaillement et effort normal

Ce contrôle sera effectué selon l'EN 1993-1-1 articles 6.2.8, 6.2.9 et 6.2.10.

Pour la flexion biaxiale, le critère suivant peut être utilisé selon la formule (6.41) :

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1$$

Formule dans laquelle α et β sont définis comme suit :

- Sections I et H : $\alpha = 2$; $\beta = 5n$ mais $\beta \geq 1$
- Sections creuses circulaires : $\alpha = 2$; $\beta = 2$
- Sections creuses rectangulaires :

$$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1 - 1,13n^2}$$

Mais :

$$\alpha = \beta \leq 6$$

Avec :

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

Dans l'un des cas suivants, l'influence de l'effort de cisaillement sur la résistance en flexion ne peut pas être justifié par l'article spécifié :

- La résistance plastique en cisaillement n'est pas disponible car un contrôle élastique en cisaillement a été fait, ce qui signifie que le coefficient de réduction ρ ne peut pas être déterminé.
- A cause d'un fort cisaillement, le coefficient de réduction est $\rho > 1$, ce qui entraîne une réduction négative.
- Dans le cas où il n'y a pas de moment fléchissant correspondant, la réduction du cisaillement ne peut pas s'appliquer (par exemple V_z combiné à M_z et donc pas de M_y correspondant).

Dans chacun de ces cas, une vérification élastique, utilisant le critère d'élasticité selon l'article 6.2.1(5) (formule (6.1)) sera effectuée à la place.

Les valeurs $M_{N,y,Rd}$ et $M_{N,z,Rd}$ dépendent de la résistance du moment, réduit par un coefficient fonction de « n », le contrôle de l'effort normal (formules (6.39) et (6.40)) :

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1-n) / (1-0,5.a_w)$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} (1-n) / (1-0,5.a_t)$$

Et $M_{pl,Rd}$ dépend de la limite d'élasticité f_y .

Si $V_{Ed} \geq 0,5 \cdot V_{pl,T,Rd}$: la limite élastique sera réduite par un coefficient ρ selon la formule (6.29) :

$$(1 - \rho) * f_y$$

Où :

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

Et :

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

Lorsque de la torsion est présente, ρ doit être obtenu ainsi :

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1 \right)^2$$

Sections de classe 3 (EN 1993-1-1 article 6.2.9.2) :

En absence de cisaillement, pour les sections de classe 3, la contrainte longitudinale maximale devrait satisfaire le critère de la formule (6.42) :

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Sections de classe 4 (EN 1993-1-1 article 6.2.9.3) :

En absence de cisaillement, pour les sections de classe 4, la contrainte longitudinale maximale devrait satisfaire le critère de la formule (6.43) :

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Le critère suivant selon la formule (6.44) doit être rempli :

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{W_{eff,y,min} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz}}{W_{eff,z,min} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \leq 1$$

Avec :

- A_{eff} : aire efficace de la section lorsque soumise à de la compression uniforme.
- $W_{eff,min}$: module de section efficace de la section lorsque soumise uniquement à un moment sur l'axe concerné.
- e_N : excentricité du centre de gravité concerné lorsque la section est soumise à de la compression uniquement.

Exemple : Industrial Hall.esa

Prenons pour exemple l'élément poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

Contrôle compression			
Selon EN 1993-1-1 article 6.2.4 et formule (6.9)			
Aire de la section	A	1.8753e+04	mm ²
Résistance à la compression	$N_{c,Rd}$	4407.07	kN
Contrôle unité		0.04	-

Le contrôle unité (ou $N_{Ed} / N_{c,Rd}$) = 0,04, donc n = 0,04.

Contrôle à l'effort tranchant pour V_y			
Selon EN 1993-1-1 article 6.2.6 et formule (6.17)			
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Aire de cisaillement	A_v	9.4086e+03	mm ²
Résistance plastique à l'effort tranchant pour V_y	$V_{pl,y,Rd}$	1276.54	kN
Contrôle unité		0.00	-

Contrôle à l'effort tranchant pour V_z			
Selon EN 1993-1-1 article 6.2.6 et formule (6.17)			
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Aire de cisaillement	A_v	1.1389e+04	mm ²
Résistance plastique à l'effort tranchant pour V_z	$V_{pl,z,Rd}$	1545.22	kN
Contrôle unité		0.07	-

Le contrôle unité pour l'effort de cisaillement est inférieur à 0,5, il n'y a donc pas de réduction de la résistance élastique pour le contrôle combiné.

Contrôle combiné flexion, effort normal et effort tranchant

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.9.1 et formule (6.41)

Moment de flexion plastique	$M_{pl,y,Rd}$	1201.21	kNm
Exposant pour le ratio de flexion y	α	2.00	
Moment de flexion plastique	$M_{pl,z,Rd}$	148.25	kNm
Exposant pour le ratio de flexion z	β	1.00	

Contrôle unité (6.41) = 0.01 + 0.00 = 0.01 -

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5.1115 \cdot 10^6 [\text{mm}^3] \times 235.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 1201.21 [\text{kNm}] \quad (\text{EC-1-1: 6.13})$$

$\alpha = 2.00$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6.3087 \cdot 10^5 [\text{mm}^3] \times 235.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 148.25 [\text{kNm}] \quad (\text{EC-1-1: 6.13})$$

$\beta = 1.00$

$$\text{Contrôle unité} = \left(\frac{|M_{y,Ed}|}{M_{pl,y,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{|M_{z,Ed}|}{M_{pl,z,Rd}} \right)^\beta = \left(\frac{|-117.05 [\text{kNm}]|}{1201.21 [\text{kNm}]} \right)^{2.00} + \left(\frac{|-0.06 [\text{kNm}]|}{148.25 [\text{kNm}]} \right)^{1.00} = \mathbf{0.01} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC-1-1: 6.41})$$

Note: Les efforts tranchants sont inférieurs à la moitié de la résistance plastique à l'effort tranchant.

Par conséquent, leur influence sur les moments résistants est négligée.

Note: Puisque l'effort normal satisfait les deux critères (6.33) et (6.34) de l'EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) son effet sur le moment résistant selon l'axe y-y est négligé.

Note: Puisque l'effort normal satisfait le critère (6.35) de l'EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) son effet sur le moment résistant selon l'axe z-z est négligé.

Chapitre 5: Vérification de la stabilité à l'ELU

Le contrôle en stabilité se trouve dans SCIA Engineer dans le processus Acier puis « Contrôle ELU de l'acier ». Dans les propriétés du contrôle, vous pouvez choisir de regarder la sortie brève, synthétique ou détaillée, comme expliqué dans le chapitre précédent.

Ci-dessous le contrôle en stabilité sera explicité, et les résultats détaillés seront présentés.

5.1. Classification

La classification peut être différente pour le contrôle en section et pour le contrôle en stabilité.

Classification dans le contrôle en section : la classification est faite pour chaque section de l'élément, puis le contrôle en section sera effectué avec la classe et les efforts internes de chaque section.

Classification dans le contrôle en stabilité : la classe la plus grande le long de l'élément est utilisée pour le contrôle en stabilité de toutes les sections de l'élément.

Par conséquent, pour une poutre avec le contrôle le plus important à 2m du début de la poutre :

- Le contrôle en section prendra en compte les efforts internes à 2m du début de la poutre, et effectuera une classification avec ces efforts internes.
- Le contrôle en stabilité sera effectué avec les efforts internes à 2m du début de la poutre, mais pas avec la classe de cette position. Peut-être que cette section a un moment très important par rapport à l'effort de compression. La classe résultante peut être la classe 1.
- Mais dans le début de la poutre, le moment de flexion est égal à 0, alors peut-être que la classe ici sera la classe 4. Le contrôle de stabilité prend donc en compte les efforts internes de la section à 2m du début de la poutre, mais prend en considération la classe 4 (à 0m de l'élément).

5.2. Flambement flexionnel

Le contrôle en flambement flexionnel sera effectué selon l'EN 1993-1-1 art. 6.3.1 formule (6.46) :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$N_{b,Rd}$ est calculé avec un coefficient réducteur χ , qui dépend du coefficient de flambement k . Comme ce coefficient de flambement joue un rôle important dans ce calcul, nous commencerons par expliquer ce coefficient puis nous nous concentrerons sur le contrôle en flambement flexionnel lui-même plus loin dans ce chapitre.

5.2.1. Coefficients de flambement

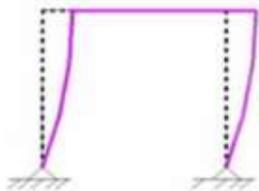
Dans SCIA Engineer, les coefficients de flambement k_y et k_z peuvent être calculés automatiquement, ou bien ils peuvent être saisis manuellement.

Depuis SCIA Engineer 18.0, une boîte de dialogue permet de définir les paramètres de flambement dans un groupe de flambement spécifique appelé « Longueurs de référence et paramètres de flambement ». Avant la version 18.0 de SCIA Engineer, il existait une boîte de dialogue pour ces paramètres qui permettait un paramétrage similaire mais sans la fenêtre graphique et sans les résultats.

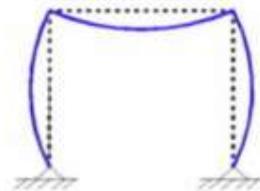
- **Méthode générale**

Les coefficients de flambement k_y et k_z sont par défaut automatiquement calculés par SCIA, sur la base de deux formules approchées, respectivement pour des structures à nœuds déplaçables et des structures à nœuds non déplaçables. Ces formules donnent les coefficients de flambement qui sont, respectivement, plus grand (structures à nœuds déplaçables) ou plus petit (structures à nœuds non déplaçables) que 1.

Portique à nœuds déplaçables

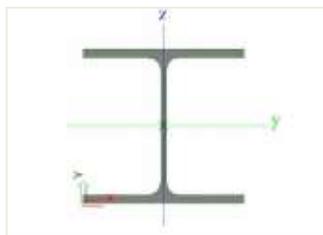


Portiques à nœuds non déplaçables

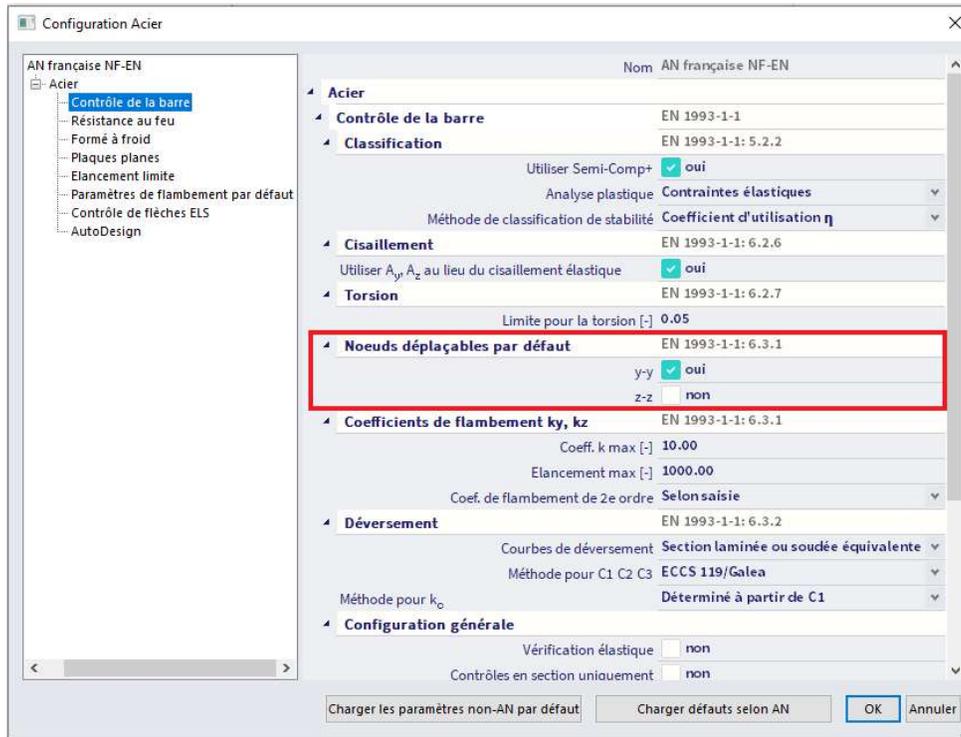


Il est donc important pour cette méthode, de choisir correctement l'option de déplacement ou non-déplacement pour les deux directions locales :

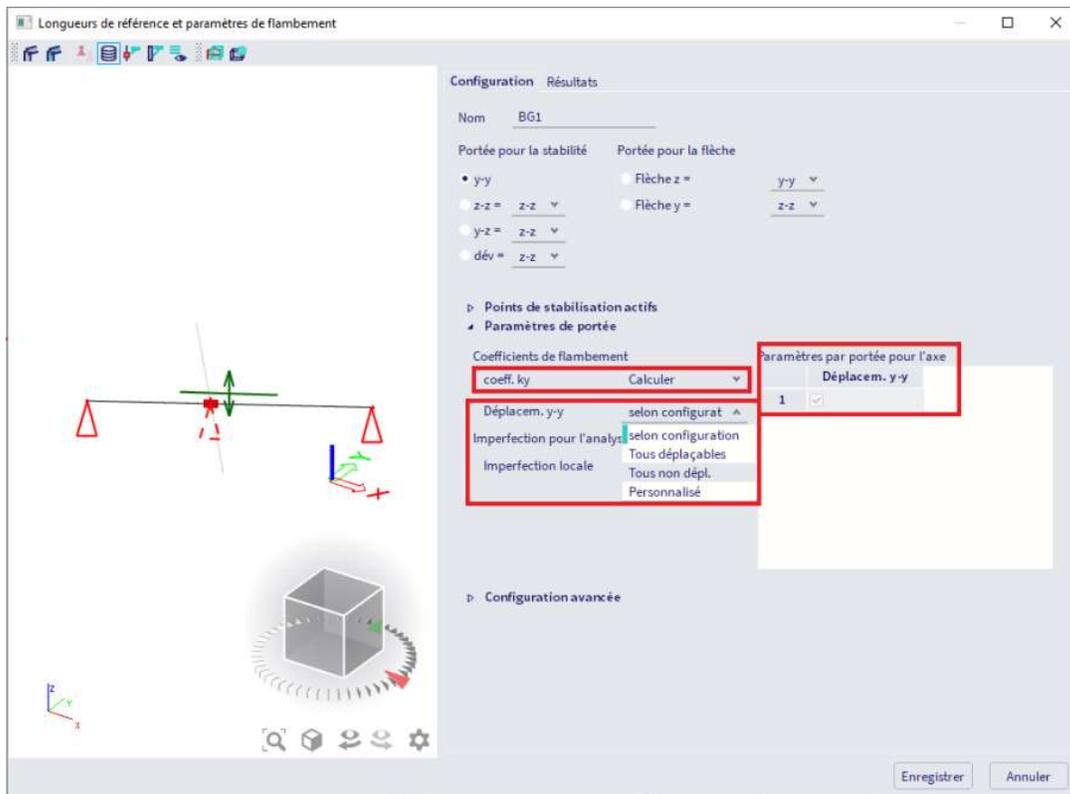
- y-y : flambement autour de l'axe local y (donc déformations dans la direction de l'axe local z)
- z-z : flambement autour de l'axe local z (donc déformations dans la direction de l'axe local y)



Les options « déplaçables » ou « non-déplaçables » peut être choisies dans le processus Acier, puis « Configuration Acier » :



Cela peut également être modifié pour chaque élément séparément, en utilisant la boîte de dialogue « Longueurs de référence et paramètres de flambement ». Ces propriétés peuvent être modifiées directement dans la zone graphique.



Pour « Déplacement y-y » et « Déplacement z-z », il y a 4 options :

- « Selon configuration » : la même option que dans « Configuration Acier » (comme vu précédemment) sera prise en compte.
- « Tous déplaçables » : cette option définit toutes les travées de ce système d'axe comme à nœuds déplaçables.
- « Tous non déplaçables » : cette option définit toutes les travées de ce système d'axe comme à nœuds non déplaçables.
- « Personnalisé » : cette option permet d'éditer les paramètres de déplacement par travée.

Les formules suivantes sont utilisées pour les coefficients de flambement :

- Pour une structure à nœuds non déplaçables ($k \leq 1$) :

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

- Pour une structure à nœuds déplaçables (flexible) ($k > 1$) :

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

Avec :

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

$$\rho_i = C_i L / EI$$

k : coefficient de flambement

L : longueur de référence

E : module d'Young

I : module d'inertie

$C_i = M_i / \varphi_i$: rigidité au nœud i

M_i : moment au nœud i

φ_i : rotation au nœud i

Les valeurs de M_i et φ_i sont approximativement déterminées par les efforts internes et les déplacements, calculés par les cas de charges qui génèrent des déformations, ayant une infinité avec les formes de flambement. Donc lorsque vous effectuez un calcul linéaire, en arrière-plan, deux cas de charges additionnels sont créés, juste pour calculer les coefficients de flambement pour les éléments.

Ce calcul est fait automatiquement lors d'un calcul linéaire. **Lors d'un calcul non-linéaire, vous devez donc également effectuer un calcul linéaire, sinon aucun coefficient de flambement ne sera calculé et aucun contrôle d'acier ne sera effectué.**

Les cas de charges suivants sont pris en compte dans le calcul linéaire pour le calcul des coefficients de flambement :

- Cas de charge 1 (Positif) :
 - o Charges distribuées localement : $q_y = 1\text{N/m}$ et $q_z = -100\text{N/m}$ sur les poutres
 - o Charges distribuées globalement : $Q_x = 10000\text{N/m}$ et $Q_y = 10000\text{N/m}$ sur les poteaux
- Cas de charge 2 (Négatif) :
 - o Charges distribuées localement : $q_y = -1\text{N/m}$ et $q_z = -100\text{N/m}$ sur les poutres
 - o Charges distribuées globalement : $Q_x = -10000\text{N/m}$ et $Q_y = -10000\text{N/m}$ sur les poteaux

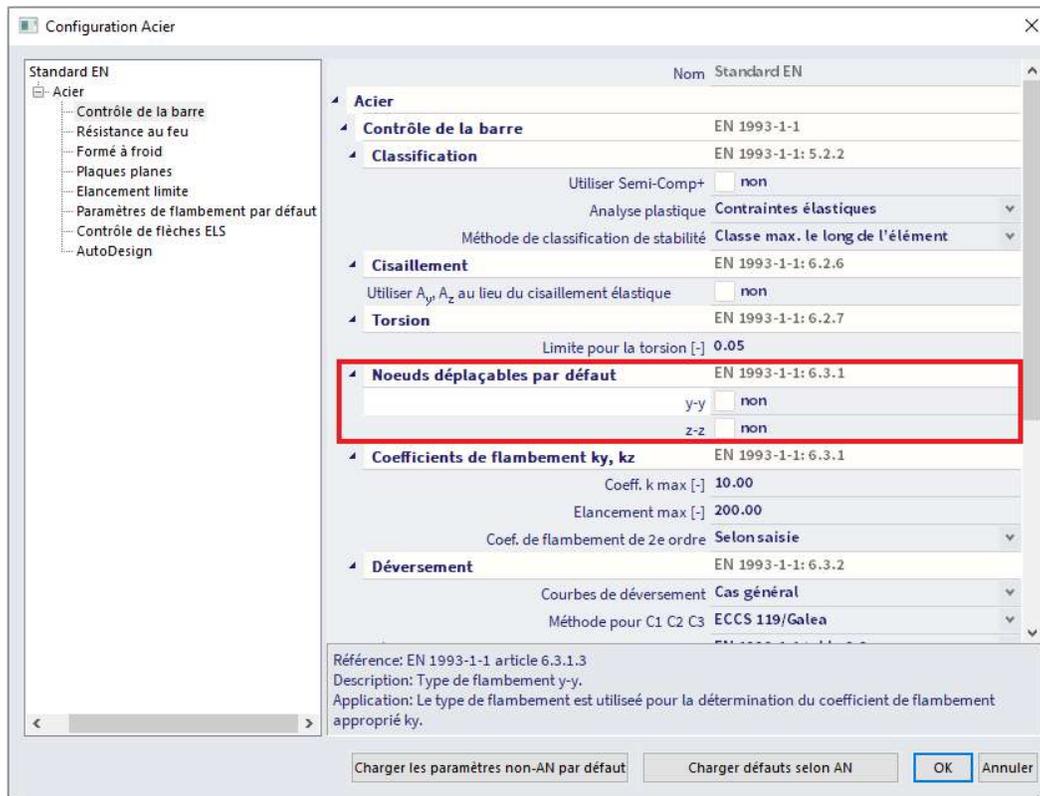
L'approche utilisé donne de bons résultats pour les structures en portiques avec des attaches de poutres **rigides ou semi-rigides. Pour les autres cas, il vous faut évaluer les coefficients de flambement présentés.**

Le concept de structure à nœuds déplaçables ou non-déplaçables est directement lié à la question du coefficient α_{cr} de l'analyse en stabilité (cf référence ECCS 119) :

- Lorsque $\alpha_{cr} \geq 10$, la structure est à nœuds non-déplaçables, donc les coefficients de flambement seront inférieurs à 1 ;
- Lorsque $\alpha_{cr} < 10$, la structure est à nœuds déplaçables, donc les coefficients de flambement seront supérieurs à 1.

Par conséquent, il faut effectuer une analyse en stabilité avant de définir les paramètres « déplaçables » ou « non-déplaçables ». De cette manière, vous pouvez mieux optimiser les coefficients de flambement k_y et k_z qu'avec seulement une analyse linéaire.

- Si $\alpha_{cr} \geq 10$, vous pouvez simplement effectuer une analyse linéaire en spécifiant, dans la fenêtre de Configuration Acier, le comportement « non-déplaçable » de la structure pour les directions y-y et z-z. Alors la formule correspond aux nœuds non-déplaçables sera utilisée pour calculer les coefficients de flambement de tous les éléments.



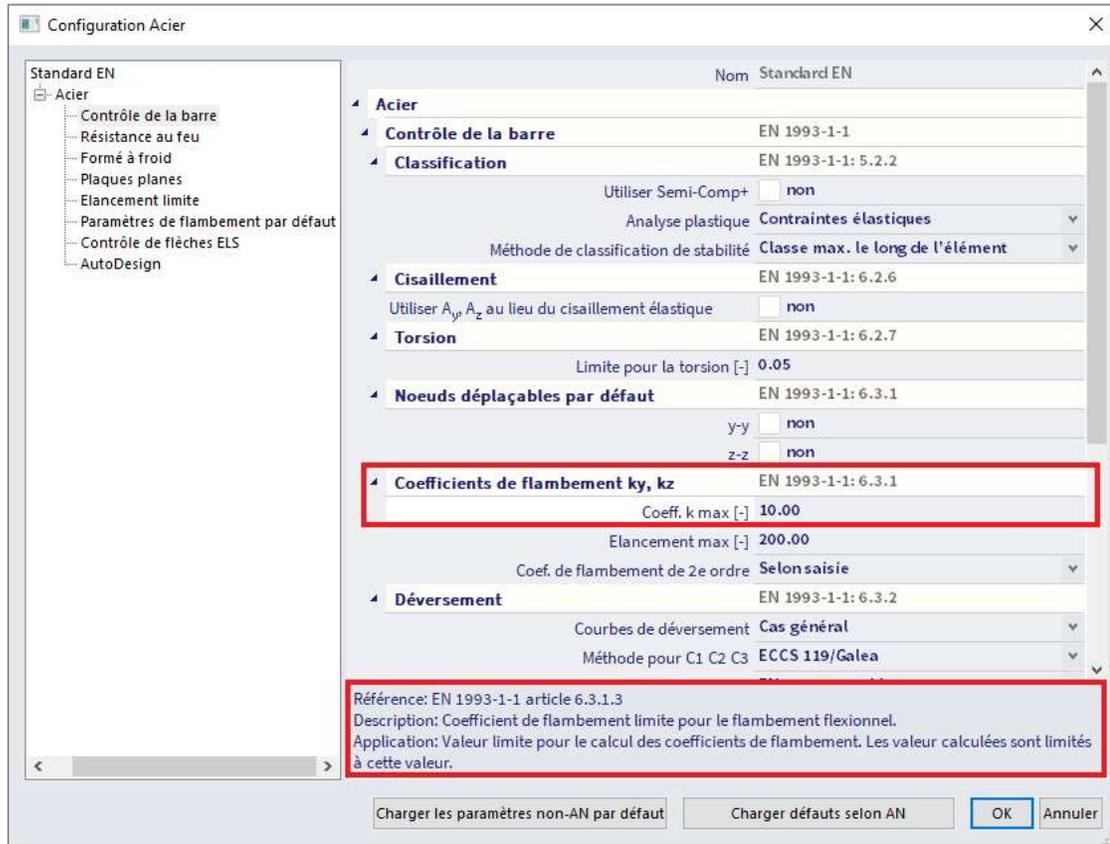
- Dans le cas où $\alpha_{cr} < 10$, vous pouvez choisir les coefficients de flambement dans le cas d'une structure à nœuds déplaçables (coefficients qui sont donc toujours plus grands que 1). Cette méthode permet une analyse plus simple qui respecte l'analyse au second ordre et qui prend en compte les imperfections locales et globales. Toutefois, vous devez bien vérifier que cette possibilité est autorisée dans la norme de calcul (par exemple, l'annexe nationale belge de l'Eurocode ne permet pas cette méthode, ce qui nécessite une analyse au second ordre). A noter également que cette méthode est plus conservative avec le respect de l'analyse au second ordre et la prise en compte des imperfections locales et globales.

NB : « déplaçable » et « non déplaçable » ne sont pas équivalent à « contreventé » ou « non contreventé » :

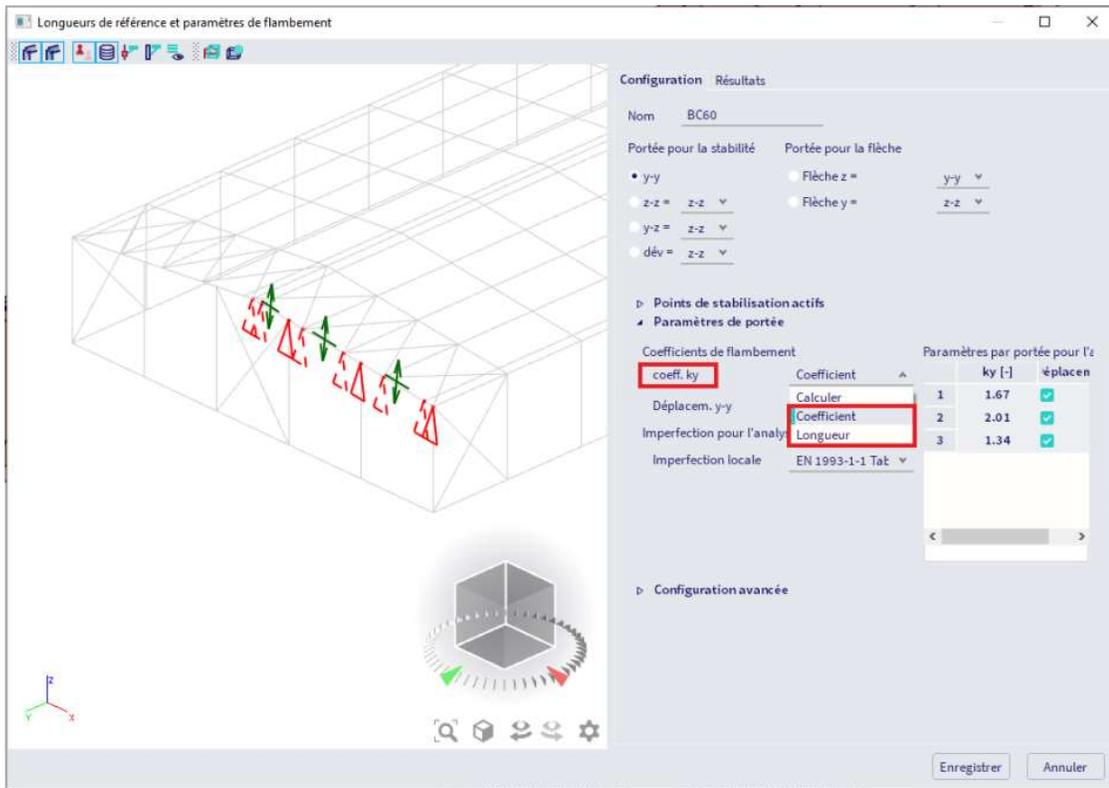
- o Si $\Psi_{br} > 0,2$, Ψ_{unbr} : le portique est non contreventé.
 - o Si $\Psi_{br} \leq 0,2$, Ψ_{unbr} : le portique est contreventé.
- Ψ_{br} est la flexibilité latérale de la structure avec système de contreventement.

Comme déjà dit précédemment, les formules utilisées pour le calcul de k_y et de k_z ne sont valables que pour des structures à portiques rigides ou semi-rigides. Cette limitation implique que les valeurs de k_y et de k_z , qui sont automatiquement calculées par SCIA, devraient absolument être vérifiées dans le cas contraire à ce qui a été spécifié ci-avant. Dans de tels cas, vous avez plusieurs possibilités :

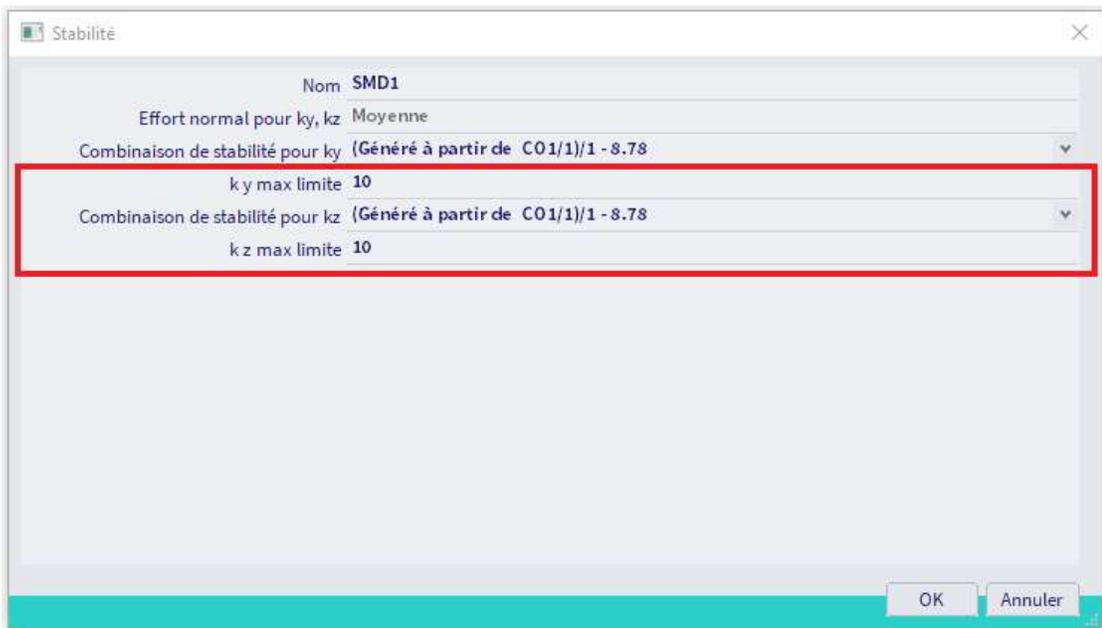
- Limitations des valeurs calculées de k_y et de k_z : à définir dans la fenêtre de « Configuration Acier » :



- Saisie manuelle des coefficients de flambement ou de la longueur de flambement, à définir dans la fenêtre « Longueurs de référence et paramètres de flambement » :



- Calcul numérique des coefficients de flambement à partir d'une analyse en stabilité. Dans ce dernier cas, une analyse en stabilité devrait être effectuée, et le mode d'instabilité de l'élément, pour lequel k_y et k_z sont recherchés, doit être extrait. Une fois cela fait, ces modes de stabilité peuvent être affectés à l'élément via le processus Acier / Données de stabilité d'élément.



Exemple : Buckling Factor.esa

Prenons pour exemple l'élément poteau B1 :

- L = 4000mm
- Défini comme « à nœuds déplaçables »
- Au nœud N1 : $M_y = 0\text{kN.m} \Rightarrow C_2 = \rho_2 = 0$
- Ce nœud N1 définit ρ_2 car ρ_2 est toujours le plus petit des deux.
- Au nœud N2, pour le cas de charges LC1 :
 - o $M_{y1} = 79883\text{kN.m}$
 - o $\varphi_1 = \varphi_y = 1523,3\text{mrad}$
 - o $C_1 = M_{y1} / \varphi_1 = 79883\text{kN.m} / 1523,3\text{mrad} = 52,44 \text{ kN.m/mrad} = 5,244 \times 10^{10} \text{ Nmm/rad}$
 - o $E = 210000\text{N/mm}^2$
 - o $I_y = 162700000\text{mm}^4$

- o Valeur de ρ_1 :

$$\rho_1 = \frac{C_1 L}{EI} = \frac{5,244 * \frac{10^{10}\text{N.mm}}{\text{rad}} * 4000\text{mm}}{210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 162700000\text{mm}^4} = 6,139$$

- o Valeur de x :

$$x = \frac{4\rho_1\rho_2 + \pi^2\rho_1}{\pi^2(\rho_1 + \rho_2) + 8\rho_1\rho_2} = \frac{4 * 6,139 * 0 + \pi^2 * 6,139}{\pi^2(6,139 + 0) + 8 * 6,139 * 0} = 1,0$$

- o Valeur de k :

$$k = \sqrt{x \frac{\pi^2}{\rho_1 \cdot x} + 4} = \sqrt{1,0 \frac{\pi^2}{6,139 * 1,0} + 4} = 2,368$$

- o Valeur de N_{cr} :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{k^2 L^2} = \frac{\pi^2 * \frac{210000\text{N}}{\text{mm}^2} * 162700000\text{mm}^4}{(2,368)^2 (4000)^2} = 3758575\text{N} = 3759\text{kN}$$

Ces valeurs peuvent être lues dans SCIA Engineer. Dans le processus Acier / Elancement Acier, on peut visualiser le coefficient k_y et la longueur de flambement :

Elancement acier									
Calcul linéaire									
Elément	Nom prof.	Partie	Nds dépl. y	l_y	k_y	l_y	Lam y	l_z	I DEV
				[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[m]
			Nds dépl. z	l_z	k_z	l_z	Lam z		
				[m]	[-]	[m]	[-]		
B1	CS1	1	Oui	4.000	2.37	9.472	63.31	4.000	4.000
			Oui	4.000	1.00	4.000	105.61		

Ces valeurs peuvent également être visualisées dans le processus Acier / Contrôle ELU de l'acier, sous le contrôle en stabilité, pour le poteau B2. Ici est aussi notée la charge critique d'Euler N_{cr} :

Paramètres de flambement		yy	zz	
Noeuds déplaçables		déplaçable	déplaçable	
Longueur système	L	4.000	4.000	m
Coefficient de flambement	k	2.37	1.00	
Longueur de flambement	l_{cr}	9.472	4.000	m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	3758.82	1351.09	kN
Elancement	λ	63.31	105.61	
Elancement relatif	λ_{rel}	0.67	1.12	
Elancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.20	0.20	

▪ **Calcul des coefficients de flambement pour des diagonales en croix**

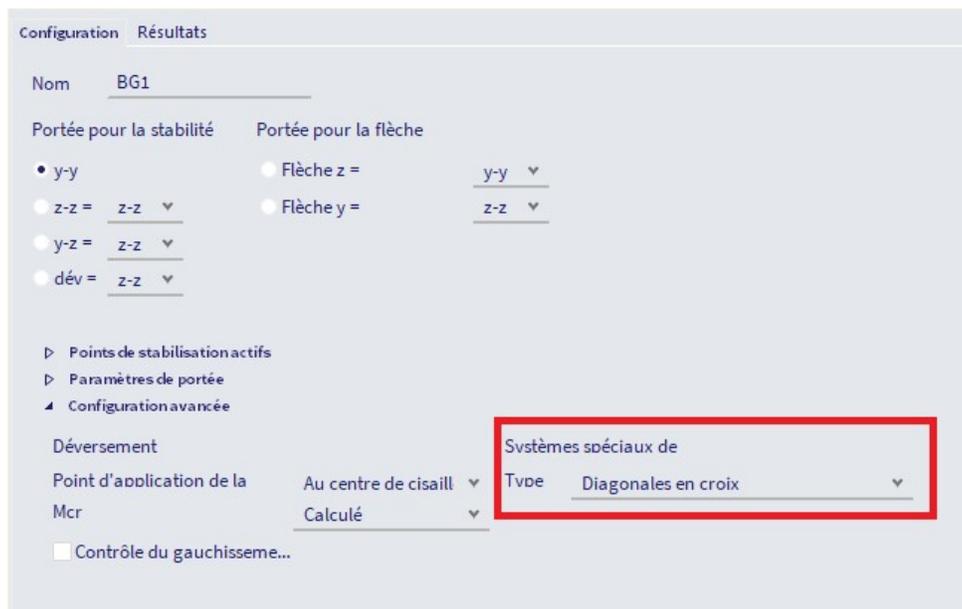
Comme la méthode précédente est valable uniquement pour les attaches perpendiculaires, elle ne peut pas être utilisée pour le calcul des coefficients de flambement pour les diagonales.

Dans les DIN 1880 Teil 2, tableau 15, une méthode est donnée pour le calcul des coefficients de flambement des diagonales qui se croisent. Dans SCIA Engineer, cette option est aussi implémentée. Dans cette méthode, la longueur de flambement s_K est calculée en fonction de la distribution de la charge dans l'élément et s_K n'est pas une donnée géométrique pure.

Cette méthode n'est applicable que pour 2 diagonales avec attache rigide ou articulée au milieu. Pour utiliser cette fonctionnalité dans SCIA Engineer, il faut connecter les deux diagonales avec l'option « Lien transversal » :



Lorsque deux poutres sont connectées par cette option, dans la fenêtre « Longueurs de référence et paramètres de flambement » des deux éléments, vous pouvez définir les « Diagonales en croix » dans les types de systèmes spéciaux (cette option se trouve dans la « Configuration avancée ») :



Si cette option est utilisée, alors SCIA Engineer utilisera la méthode de l'EN 1993-2 pour calculer les coefficients de flambement des diagonales :

	1	2	3
1		$\beta = \sqrt{\frac{1 - \frac{3Z\ell}{4N\ell_1}}{1 + \frac{I_1\ell^3}{I\ell_1^3}}}$ but $\beta \geq 0,5$	
2		$\beta = \sqrt{\frac{1 + \frac{N_1\ell}{N\ell_1}}{1 + \frac{I_1\ell^3}{I\ell_1^3}}}$ but $\beta \geq 0,5$	$\beta_1 = \sqrt{\frac{1 + \frac{N\ell_1}{N_1\ell}}{1 + \frac{I\ell^3}{I_1\ell_1^3}}}$ but $\beta_1 \geq 0,5$
3		continuous compression members $\beta = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 N_1\ell}{12 N\ell_1}}$	hinged compression members $\beta_1 = 0,5$ when $EI \geq \frac{N_1\ell^3}{\pi^2\ell_1} \left(\frac{\pi^2}{12} + \frac{N\ell_1}{N_1\ell} \right)$
4		$\beta = \sqrt{1 - 0,75 \frac{Z\ell}{N\ell_1}}$ but $\beta \geq 0,5$	
5		$\beta = 0,5$ when $\frac{N\ell_1}{Z\ell} \leq 1$ or when $EI_1 \geq \frac{3Z\ell_1^2}{4\pi^2} \left(\frac{N\ell_1}{Z\ell} - 1 \right)$	
6		$\beta = \left(0,75 - 0,25 \frac{Z}{N} \right)$ but $\beta \geq 0,5$	$\beta_1 = \left(0,75 - 0,25 \frac{N_1}{N} \right)$ $N_1 < N$

Avec :

- β coefficient de la longueur de flambement
- L longueur de l'élément
- l_1 longueur de la diagonale porteuse
- 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 porteuse
- N effort de compression dans l'élément
- N_1 effort de compression dans la diagonale porteuse
- Z effort de traction dans la diagonale porteuse
- E modules d'Young (module élastique)

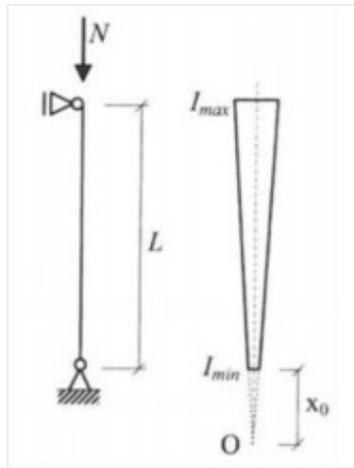
▪ **Calcul des coefficients de flambement pour un élément variable**

Dans le cas d'un élément variable, SCIA Engineer utilisera un autre calcul pour la longueur de flambement.

Un élément variable est défini comme suit : l'élément a les propriétés d'une section en I symétrique où seule la hauteur est linéaire le long de l'élément. La longueur de référence pour le flambement autour de l'axe local y-y (axe fort), est égale à la longueur de l'élément.

Pour un élément variable, on peut définir :

k_y	coefficient de flambement autour de l'axe y-y
L_y	longueur de référence autour de l'axe y-y
$I_{y,max}$	moment d'inertie maximum autour de l'axe y-y
$I_{y,min}$	moment d'inertie minimum autour de l'axe y-y
$I_{y,Eq}$	moment d'inertie équivalent autour de l'axe y-y
E	module de Young (module élastique)
$N_{cr,y}$	effort critique d'Euler autour de l'axe y-y



Hirt et Crisinel (Réf. [17]) donnent les expressions pour la charge critique élastique de sections doublement symétrique avec éléments non prismatiques chargés axialement. Le flambement flexionnel autour de l'axe fort des sections se produit :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{y,eq}}{(k_y L_y)^2}$$

Où :

$$I_{y,eq} = C * I_{y,max}$$

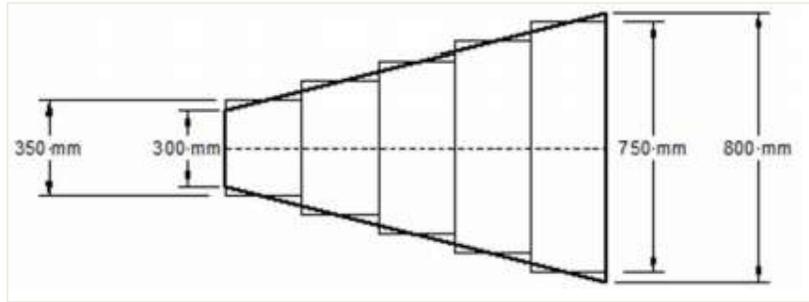
C est un coefficient qui dépend du paramètre r, défini comme le ratio entre le moment d'inertie minimum et maximum :

$$r = \sqrt{\frac{I_{y,min}}{I_{y,max}}}$$

Pour un élément élancé, C peut être calculé comme suit :

$$C = 0,08 + 0,92 \cdot r$$

Exemple : VARH.esa



Prenons pour exemple l'élément poteau B2 : la partie variable va de 800mm à 300mm.

L'élément variable est divisé en interne en un nombre d'éléments prismatiques. Dans ce cas, l'élément sera divisé en 5 parties, mais cela peut être modifié dans les « Paramètres de maillage » :



$$I_{y,\min} = 1,7041 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,\max} = 1,5851 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{I_{y,\min}}{I_{y,\max}}} = \sqrt{\frac{1,7041 \cdot 10^8 \text{ mm}^4}{1,5851 \cdot 10^9 \text{ mm}^4}} = 0,327883$$

$$C = 0,08 + 0,92 * r = 0,38$$

$$I_{y,eq} = C * I_{y,max} = 0,38 * 1,5851 \cdot 10^9 = 6,0495 \cdot 10^8 \text{mm}^4$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 * E * I_{y,eq}}{k_y^2 * L_y^2} = \frac{\pi^2 * 2,1 * 10^8 * 6,0495 * 10^{-4}}{4,16^2 * 4^2} = 4528,27 \text{kN}$$

Contrôle flambement flexionnel

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.46)

Paramètres de flambement		yy	zz	
Noeuds déplaçables		déplaçable	déplaçable	
Longueur système	L	4.000	4.000	m
Coefficient de flambement	k	4.16	1.00	
Longueur de flambement	l _{cr}	16.643	4.000	m
Charge critique d'Euler	N _{cr}	4526.74	7004.89	kN
Elancement	λ	74.93	63.23	
Elancement relatif	λ _{rel}	0.80	0.67	
Elancement limite	λ _{rel,0}	0.20	0.20	
Courbe de flambement		b	c	
Imperfection	α	0.34	0.49	
Coefficient de réduction	χ	0.73	0.74	
Résistance au flambement	N _{b,Rd}	2304.58	2353.42	kN

Données d'élément à section variable			
Moment d'inertie minimum de l'aire	I _{y,min}	1.7041e+08	mm ⁴
Moment d'inertie maximum de l'aire	I _{y,max}	1.5851e+09	mm ⁴
Coefficient de jarret	C	0.38	
Moment d'inertie équivalent de l'aire	I _{y,eq}	6.0495e+08	mm ⁴

Vérification du flambement flexionnel			
Aire de la section	A	1.3512e+04	mm ²
Résistance au flambement	N _{b,Rd}	2304.58	kN
Contrôle unité		13.99	-

5.2.2. Longueur de flambement

Dans le paragraphe précédent, le calcul général des coefficients de flambement a été expliqué pour tous les types d'éléments. A partir de ces coefficients de flambement, les longueurs de flambement d'une poutre seront calculés comme suit :

$$l = k * L$$

Avec :

- l : longueur de flambement
- k : coefficient de flambement
- L : longueur de référence

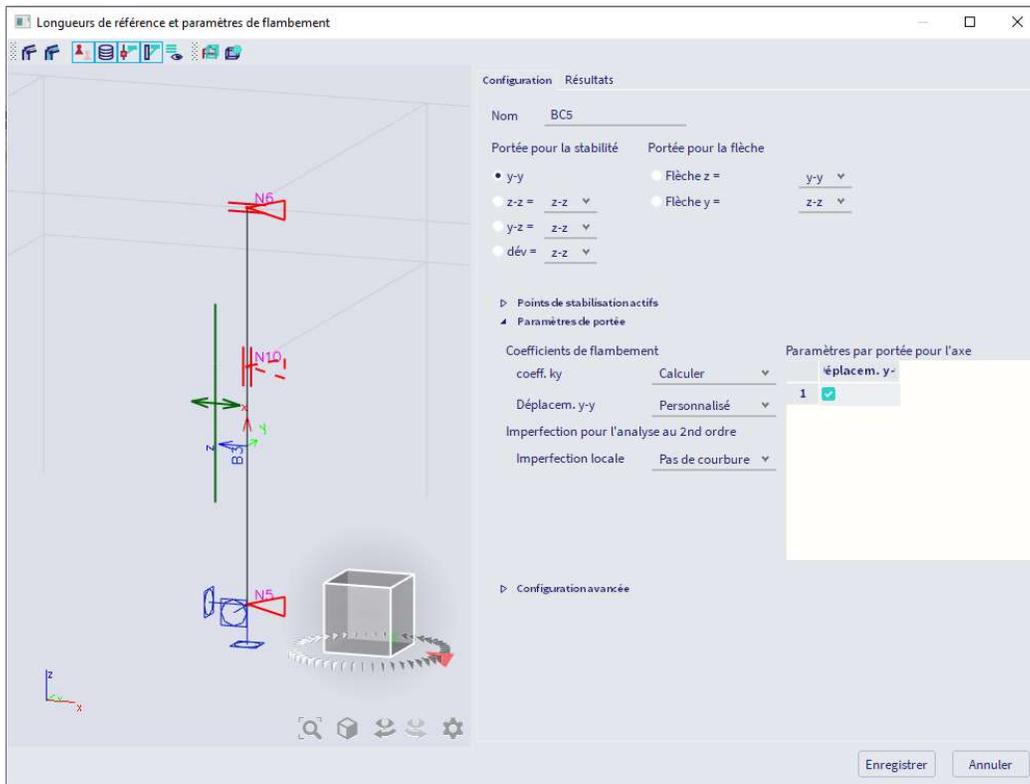
La longueur de référence d'un élément est définie par les propriétés « Longueurs de référence et paramètres de flambement » de l'élément. C'est la distance entre les points de stabilisation.

La longueur de flambement peut être calculée à partir du coefficient de flambement (qui peut être calculé automatiquement ou saisi manuellement) ou bien elle peut être entrée manuellement.

Exemple : Buckling Length.esa

Prenons pour exemple l'élément poteau B3. Ce poteau possède 3 nœuds : N5, N10 et N6. La direction x locale va du bas du poteau vers le haut du poteau, donc de manière interne dans le logiciel SCIA Engineer, N5 est le premier nœud de ce poteau et N6 le dernier.

Dans la fenêtre de propriétés de ce poteau, vous avez le choix dans la fenêtre « Longueurs de référence et paramètres de flambement ». Avec cette option, la longueur de référence de la poutre peut être saisie. Par défaut, l'option suivante apparaîtra :



Explications des longueurs de référence :

- Le premier nœud (selon l'axe local y-y) est le nœud N5, le dernier est le nœud N6.
- Direction y-y :
 - o Cela signifie « autour de l'axe local y ». Le poteau se déformera donc dans la direction z.
 - o Autour de l'axe y, le nœud N5 est supporté. Au nœud N10, aucune poutre n'est trouvée dans la direction z, donc le poteau B3 n'est pas supporté autour de l'axe y au nœud N10. Au nœud N6, une poutre horizontale dans la direction locale z peut être trouvée et le poteau sera supporté autour de l'axe local y (y-y) au nœud N6. Tout cela est indiqué par les triangles dans cette fenêtre :
 - Appuyé au nœud N5
 - Pas appuyé au nœud N10
 - Appuyé au nœud N6
- Direction z-z :
 - o Cela signifie « autour de l'axe local z ». Le poteau se déformera donc dans la direction y.
 - o Autour de l'axe z, le nœud N5 est supporté. Au nœud N10, une poutre horizontale dans la direction locale y peut être trouvée et le poteau sera supporté autour de l'axe local z (z-z) au nœud N10. Aussi, au nœud N6, une poutre horizontale dans la direction locale y peut être

trouvée et le poteau sera également supporté autour de l'axe local z (z-z) au nœud N6. Tout cela est indiqué par les triangles dans cette fenêtre :

- Appuyé au nœud N5
 - Appuyé au nœud N10
 - Appuyé au nœud N6
- La longueur de référence sera prise comme suit :
- Autour de l'axe y : la longueur entre les nœuds N5 et N6, donc 3m.
 - Autour de l'axe z : la longueur entre les nœuds N5 et N10 pour la première partie du poteau (1,8m) puis la longueur entre les nœuds N10 et N6 pour la seconde partie du poteau (1,2m).
 - Cela peut aussi être visualisé dans le processus Acier / Elancement Acier :

Elancement acier									
Calcul linéaire									
Elément	Nom prof.	Partie	Nds dépl. y	Ly	ky	ly	Lam y	lyz	I DEV
				[m]	[-]	[m]	[-]		
			Nds dépl. z	Lz	kz	lz	Lam z		
				[m]	[-]	[m]	[-]		
B3	CS3	1	Oui	3.000	1.09	3.270	18.51	1.800	1.800
			Non	1.800	0.51	0.919	26.78		
B3	CS3	2	Oui	3.000	1.09	3.270	18.51	1.200	1.200
			Non	1.200	0.57	0.680	19.83		

Dans cette fenêtre, on peut facilement vérifier les longueurs de référence (L_y et L_z), les coefficients de flambement (k_y et k_z) et les longueurs de flambement ($l_y = k_y * L_y$ et $l_z = k_z * L_z$).

Comme mentionné précédemment, depuis SCIA Engineer 18.0, une boîte de dialogue a été introduite pour appliquer les paramètres de flambement sur des systèmes de flambement particuliers. Cette boîte de dialogue s'appelle « Longueurs de référence et paramètres de flambement ».

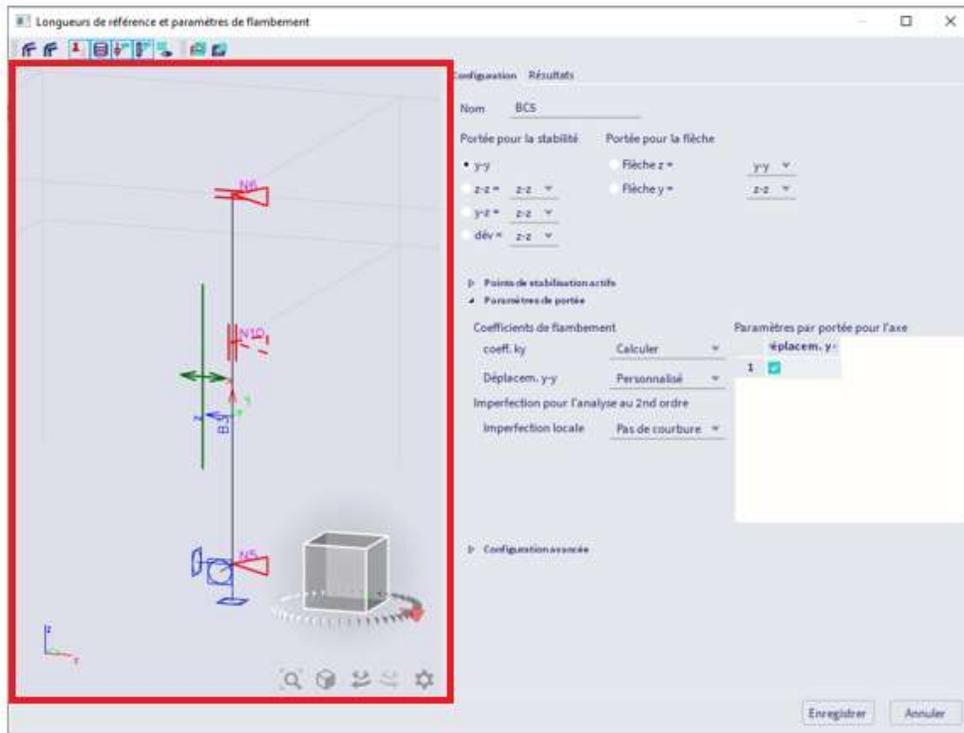
Les paramètres des longueurs de référence et des paramètres de flambement peuvent être accessibles :

- Depuis le menu principal « Bibliothèques » / « Structure et Analyse » / « Groupes de flambement », cliquer sur « Nouveau » pour créer un nouveau groupe de flambement ou cliquer sur « Modifier » pour modifier un groupe de flambement existant.
Cette fenêtre est également accessible depuis le processus Acier.
- Depuis les propriétés d'un élément 1D et « Longueurs de référence et paramètres de flambement ».

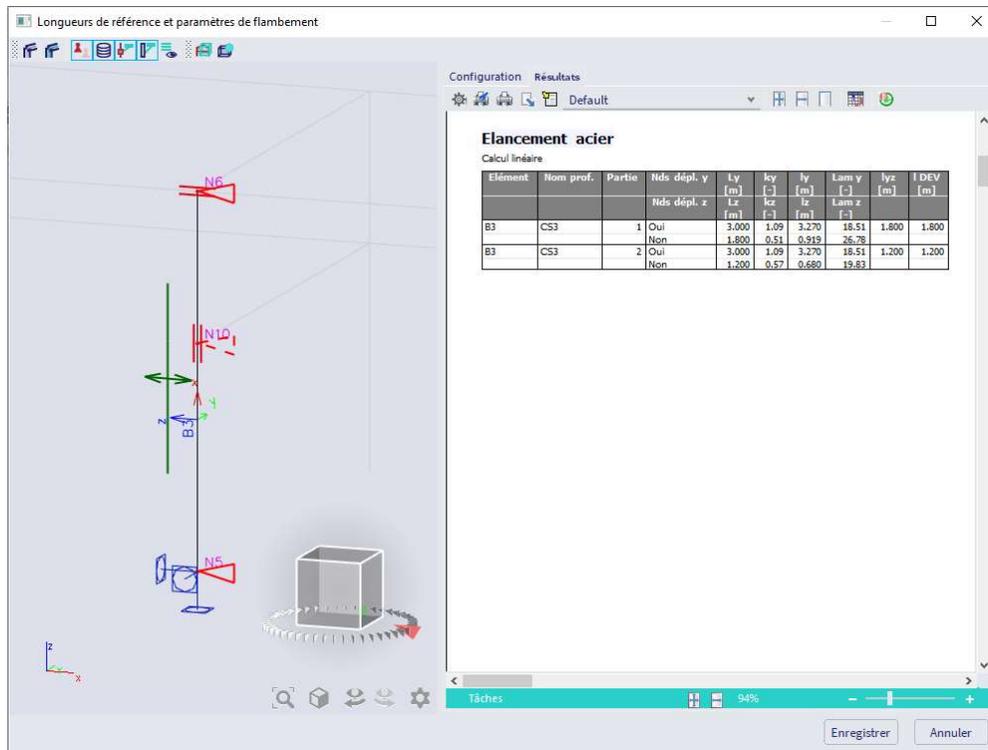
La partie gauche de la boîte de dialogue donne une représentation graphique des éléments 1D dans le plan de flambement avec leurs contraintes de flambement et les informations de déplacement par travée. Ce n'est pas seulement une représentation des paramètres décrits ci-dessus, cela permet à ces paramètres d'être **modifiés directement dans cette fenêtre graphique**, en cliquant sur les contraintes pour les définir en fixe / libre, et/ou en cliquant sur les symboles de déplacement par travée pour les définir en « Selon configuration », « Tous déplaçables », « Tous non déplaçables » ou « Personnalisé ». En cliquant sur les triangles qui indiquent les longueurs de référence de chaque partie de la poutre, vous pouvez modifier les contraintes de flambement.

Pour les contraintes de flambement, il y a deux types de symboles qui dépendent de la travée choisie :

- Le symbole « triangle » (travée pour flambement y-y, z-z et pour les flèches y et z)
- Le symbole « rectangle » (travée pour flambement y-z, et pour le déversement (LTB = Lateral Torsional Buckling)).



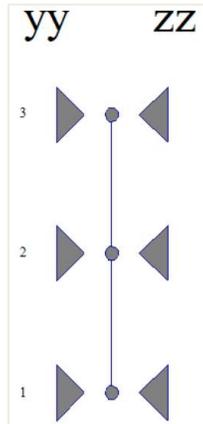
De plus, il est aisé d'accéder aux résultats. En effet, les résultats peuvent être visualisés en cliquant sur l'onglet « Résultats » de la fenêtre « Longueurs de référence et paramètres de flambement ».



Comparons les poteaux B3 et B2+B30 : ils devraient avoir exactement la même longueur de référence. La seule différence entre ces poteaux est que l'élément B3 a été saisi comme un élément de 3m alors que le poteau B2+B30 a été divisé en deux parties. SCIA Engineer tiendra compte de ces deux éléments comme un seul pour la longueur de référence à condition que :

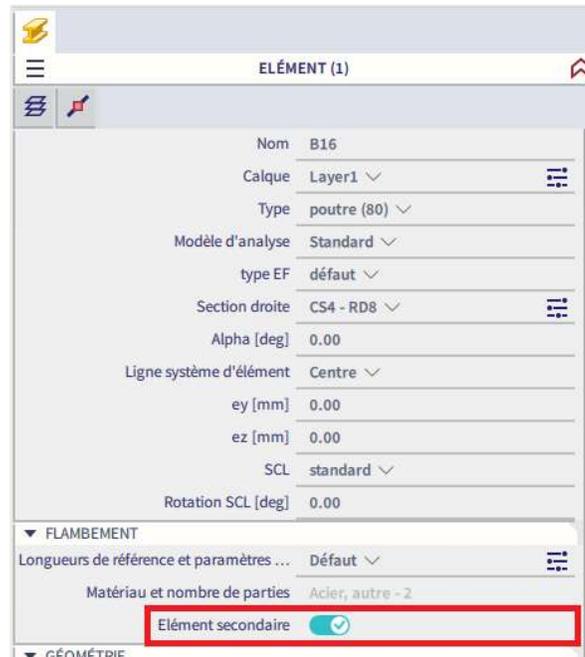
- Les axes locaux soient exactement dans la même direction (donc dans ce cas les axes locaux x sont dans la même direction et l'angle entre les éléments est exactement de 180°).
- Aucune rotule n'ait été définie entre les deux éléments.

Regardons maintenant l'élément poteau B13. Les longueurs de référence sont les suivantes (comme attendu, puisqu'il y a des poutres horizontales dans les deux directions sur chaque nœud) :

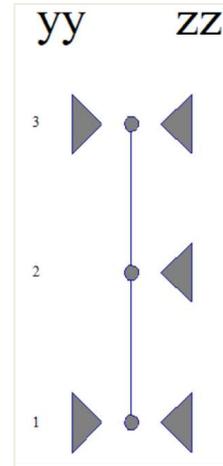
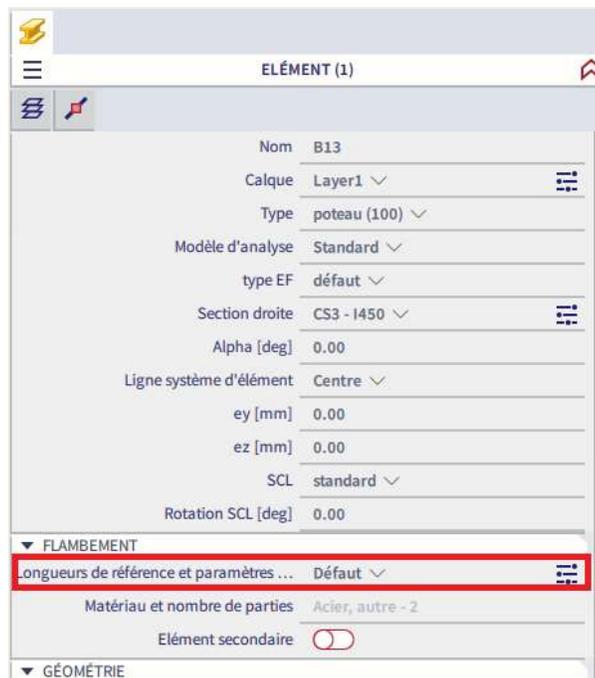


Lorsqu'on regarde la structure avec la vue en volumes, il est évident que la poutre B16 est trop faible pour avoir une influence sur la longueur de référence du poteau B13. Dans SCIA Engineer, il est possible d'exclure un élément du système de flambement.

Sélectionner la poutre B16 et aller dans le paragraphe « Flambement » des propriétés. Il est alors possible d'indiquer que la poutre B16 est un « Élément secondaire » et ne doit pas être prise en compte dans les longueurs de référence :



Lorsqu'on regarde alors à nouveau l'élément B13 et qu'on modifie les « Longueurs de référence et paramètres de flambement » pour les remettre sur « Défaut », l'élément B15 n'est alors plus inclus dans les longueurs de référence :



5.2.3. Contrôle du flambement flexionnel

Le contrôle du flambement flexionnel sera effectué selon l'EN 1993-1-1 art. 6.3.1 formule (6.46) :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

Où :

- Pour une section de classe 1, 2 ou 3 :

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

- Pour une section de classe 4 :

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{eff} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

Le coefficient de réduction X sera calculé comme suit :

$$X = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

Avec :

$$X \leq 1,0$$

Et :

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

Pour les sections de classe 1, 2 ou 3 :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}}$$

Pour les sections de classe 4 :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} * f_y}{N_{\text{cr}}}}$$

L'effort normal critique (force d'Euler) :

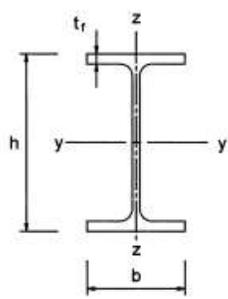
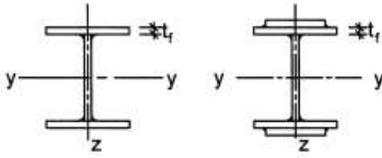
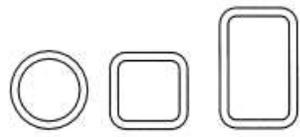
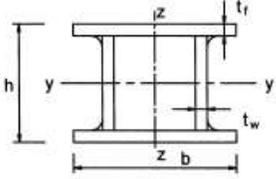
$$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 EI}{k^2 L^2}$$

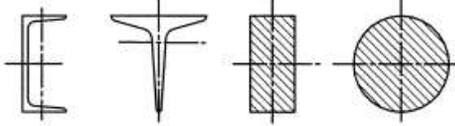
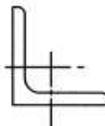
α : facteurs d'imperfection pour les courbes de flambement :

Courbe de flambement	a_0	a	b	c	d
Facteur d'imperfection α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Le choix de la courbe de flambement pour une section est fait selon l'EN 1993-1-1, tableau 6.2 :

Tableau 6.2 — Choix de la courbe de flambement pour une section transversale

Section transversale	Limites	Flambement Selon l'axe	Courbe de flambement		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Sections en I laminées 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a a ₀	a ₀ a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c
Sections en I soudées 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c	
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d	
Sections creuses 	Finies à chaud	Quelconque	a	a ₀	
	Formées à froid	Quelconque	c	c	
Sections en caisson soudées 	En général (sauf comme indiqué ci-dessous)	Quelconque	b	b	
	Soud. épaisses : $a > 0,5 t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Quelconque	c	c	

Section transversale	Limites	Flambement Selon l'axe	Courbe de flambement	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Sections en U, T et pleines 		Quelconque	c	c
Sections en L 		Quelconque	b	b

Exemple : Buckling Curves.esa

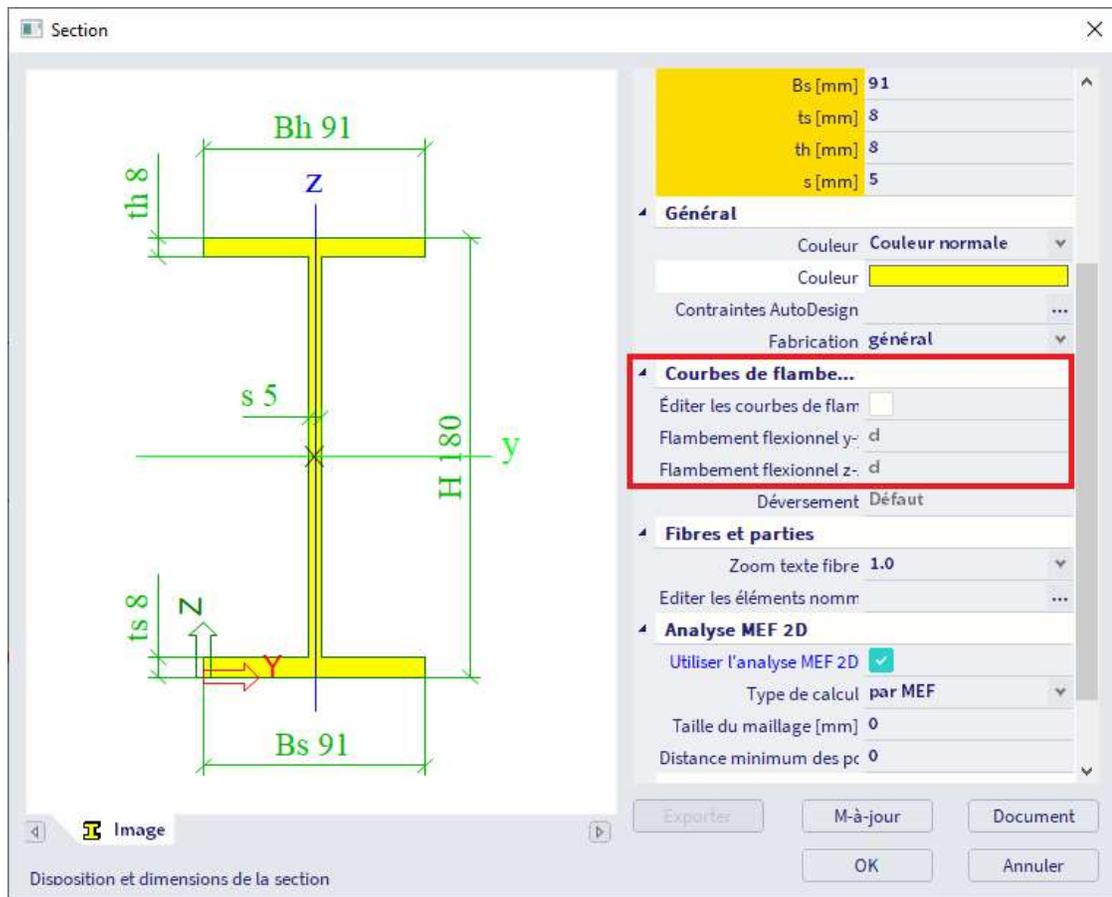
Dans le tableau 6.2, des courbes de flambement générales sont données pour la plupart des profilés les plus courants. Pour quelques types de sections, SCIA Engineer utilisera automatiquement ces courbes. Les groupes de sections supportés sont :

- Les profils acier
- Les jarrets
- Les PRS
- Les poutrelles intégrées
- Les parois minces
- Les fabriquées

Pour les autres groupes de sections, les courbes de flambement pour les deux directions seront par défaut la « d ». Cela peut être modifié manuellement en changeant les propriétés de la section.

Dans cet exemple, deux poutres sont modélisées avec deux sections différentes :

- B1 : CS1 – IPE180
 - o Courbe de flambement « a » pour y-y selon la norme
 - o Le contrôle en stabilité utilisera la courbe « a », selon la norme
- B2 : CS2 – forme I (du groupe « Formes géométriques »)
 - o Section non-standard : aucune courbe de flambement selon la norme. La courbe de flambement « d » est donc utilisée.
 - o Le contrôle en stabilité utilisera la courbe « d ».



Une fois que tous les coefficients de flambement et les longueurs de référence ont été saisis correctement, le contrôle du flambement flexionnel peut être effectué dans SCIA Engineer.

Exemple : Industrial Hall.esa

Prenons pour exemple l'élément poteau B28. L'élément est en classe 4, donc une section efficace a été calculée :

Propriétés effectives						
Aire effective	A_{eff}	1.7222e+04	mm ²			
Moment d'inertie effectif de la section	$I_{eff,y}$	1.6608e+09	mm ⁴	$I_{eff,z}$	5.2895e+07	mm ⁴
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.4111e+06	mm ³	$W_{eff,z}$	3.9920e+05	mm ³
Décalage du centre de gravité	$e_{N,y}$	0.00	mm	$e_{N,z}$	0.00	mm

SCIA Engineer montrera tout d'abord les paramètres de flambement de cet élément :

Contrôle flambement flexionnel

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.46)

Paramètres de flambement		yy	zz	
Noeuds déplaçables		déplaçable	non-déplaçable	
Longueur système	L	6.900	6.900	m
Coefficient de flambement	k	3.51	0.99	
Longueur de flambement	l_{cr}	24.239	6.841	m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	5860.39	2342.58	kN
Élancement	λ	81.44	128.81	
Élancement relatif	λ_{rel}	0.83	1.31	
Élancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.20	0.20	
Courbe de flambement		a	b	
Imperfection	α	0.21	0.34	
Coefficient de réduction	χ	0.78	0.42	
Résistance au flambement	$N_{b,Rd}$	3146.64	1699.82	kN

En-dessous, sont expliqués les résultats dans la direction y-y.

Cette direction a été définie comme « Déplaçables » dans la « Configuration Acier », le coefficient de flambement k a été calculé ainsi.

La longueur du poteau est de 6,90m. La longueur de flambement est donc de 3,51m * 6,90m = 24,239m.

A partir de cette longueur de flambement, la charge critique d'Euler N_{cr} peut être calculée, puis l'élancement et l'élancement relatif (avec la charge d'Euler).

Un profilé IPE750 a une courbe de flambement « a », et donc un coefficient d'imperfection α de 0,21.

A partir de ces propriétés, le coefficient de réduction X peut être calculé, il sera utilisé dans la formule ci-dessous :

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y \times A_{eff} \times f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.78 \times 1.7222 \cdot 10^4 [\text{mm}^2] \times 235.0 [\text{MPa}]}{1.00} = 3146.64 [\text{kN}]$$

On arrive donc à une résistance de flambement $N_{b,y,Rd} = 3146,64\text{kN}$ pour le flambement flexionnel autour de l'axe local y.

Le même principe peut être répété pour le flambement flexionnel autour de l'axe local z.

On arrive à une résistance de flambement moindre : $N_{b,z,Rd} = 1699,82\text{kN}$.

La plus petite résistance de flambement sera utilisée pour le contrôle de flambement flexionnel :

Vérification du flambement flexionnel			
Aire efficace de la section	A_{eff}	1.7222e+04	mm ²
Résistance au flambement	$N_{b,Rd}$	1699.82	kN
Contrôle unité		0.09	-

5.3. Flambement torsionnel

Le contrôle en flambement torsionnel peut être important pour les profilés dont la position du centre de cisaillement n'est pas la même que le centre de gravité de la section.

Le contrôle en flambement torsionnel (-flexionnel) est effectué selon l'EN 1993-1-1, art. 6.3.1.4. Dans le cas d'une section RHS ou CHS, le contrôle ne sera pas fait, une note s'affichera à la place. Dans le cas d'une section en I, lorsque le contrôle n'est pas dimensionnant, il ne sera pas imprimé et une note s'affichera à la place. « Pas dimensionnant » signifie ici que l'unité de contrôle est inférieure à l'unité de contrôle pour le flambement flexionnel. Dans le cas toutefois où le flambement flexionnel peut être ignoré (due à un faible effort de compression ou un faible élancement), la comparaison est faite avec l'unité de contrôle de la compression. La courbe de flambement pour le flambement torsionnel (-flexionnel) est prise égale à celle de la courbe de flambement z-z. La valeur de la charge critique élastique N_{cr} est prise comme la plus petite de $N_{cr,T}$ (flambement torsionnel) et $N_{cr,TF}$ (flambement torsionnel – flexionnel). Pour les sections doublement symétriques, la charge critique élastique N_{cr} est prise comme égale à $N_{cr,T}$.

La charge critique élastique $N_{cr,T}$ pour le flambement torsionnel, est calculée comme Ref.[37] :

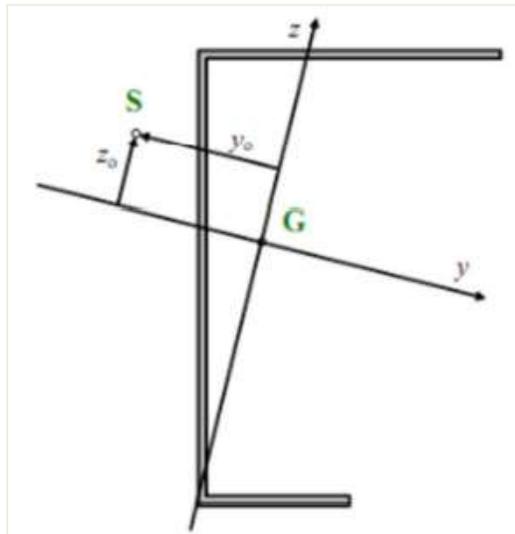
$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_T^2} \right)$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2$$

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

Avec :

G	module de cisaillement
E	module d'élasticité
i_y	rayon de giration sur l'axe fort
i_z	rayon de giration sur l'axe faible
I_t	inertie de torsion
I_w	inertie de gauchissement
l_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
$N_{cr,y}$	charge critique axiale pour le flambement flexionnel autour de l'axe y-y
$N_{cr,z}$	charge critique axiale pour le flambement flexionnel autour de l'axe z-z
$N_{cr,T}$	charge critique axiale pour le flambement torsionnel



Exemple : Flexural Torsional buckling.esa

Regardons le contrôle ELU pour l'élément B1 :

Contrôle de flambement torsionnel (-flexionnel)

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.46)

Longueur de flambement torsionnel	l_{cr}	3.600	m
Charge critique élastique	$N_{cr,T}$	2156.75	kN
Charge critique élastique	$N_{cr,TF}$	1302.24	kN
Elancement relatif	$\lambda_{rel,T}$	0.98	
Elancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.20	
Courbe de flambement		c	
Imperfection	α	0.49	
Coefficient de réduction	χ	0.55	
Aire de la section	A	5.3300e+03	mm ²
Résistance au flambement	$N_{b,Rd}$	690.40	kN
Contrôle unité		0.14	-

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \times \left(G \times I_t + \frac{\pi^2 \times E \times I_w}{l_{cr}^2} \right) = \frac{1}{125[\text{mm}]^2} \times \left(80769.2[\text{MPa}] \times 3.1000 \cdot 10^5[\text{mm}^4] + \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 5.5659 \cdot 10^{10}[\text{mm}^6]}{3.600[\text{m}]^2} \right)$$

$$= 2156.75[\text{kN}]$$

$$N_{cr,TF} = 1302.24[\text{kN}]$$

$$\lambda_{rel,T} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{5.3300 \cdot 10^3[\text{mm}^2] \times 235.0[\text{MPa}]}{1302.24[\text{kN}]} } = 0.98$$

$$\chi = \min \left(\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_{rel,T}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel,T}^2}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.17 + \sqrt{1.17^2 - 0.98^2}}, \frac{1}{0.98^2}, 1 \right) = \min(0.55, 1.04, 1) = 0.55$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times A \times f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.55 \times 5.3300 \cdot 10^3[\text{mm}^2] \times 235.0[\text{MPa}]}{1.00} = 690.40[\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.47})$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{|N_{Ed}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|-100.00[\text{kN}]|}{690.40[\text{kN}]} = \mathbf{0.14} \leq \mathbf{1.00} \quad (\text{EC3-1-1: 6.46})$$

5.4. Déversement

5.4.1. Calcul de M_{cr}

- **Formule générale**

Le moment critique élastique pour le déversement M_{cr} est calculé par la formule suivante :

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 E I_z}{(k_{LT} \cdot L)^2} \cdot \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_{LT} \cdot L)^2 \cdot G I_t}{\pi^2 E I_z} + (c_2 z_g - c_3 z_j)^2} - [c_2 z_g - c_3 z_j] \right\}$$

Avec :

E	Module d'Young (E = 210000N/mm ² pour l'acier)
G	Module de cisaillement (G = 80770N/mm ² pour l'acier)
$k_{LT} \cdot L$	Longueur de déversement de la poutre entre les points de stabilisation (l_{LTB})
I_w	Inertie de gauchissement
I_t	Inertie de torsion
I_z	Moment d'inertie sur l'axe faible
z_g	Distance entre le point d'application de la charge et le centre de cisaillement
k_w	Coefficient lié aux conditions de maintien des sections d'extrémité au gauchissement. k_w doit être pris égal à 1,0 sauf si une valeur inférieure peut être justifiée par une disposition particulière pour un maintien en gauchissement.
z_j	Pour des sections doublement symétrique, $z_j = 0$. Sinon :
	$z_j = z_s - 0,5 * \int_A (y^2 + z^2) \cdot \frac{z}{I_y} \cdot dA$
z_s	Coordonnées du centre de cisaillement
C_1, C_2 et C_3	sont des coefficients qui dépendent des chargements et des conditions aux extrémités.

Dans SCIA Engineer, plusieurs méthodes ont été implémentées pour le calcul de ces coefficients C. Ces méthodes sont expliquées plus loin dans ce chapitre.

Les sections jarrets ($I+I_{var}$, I_w+PI_{var} , I_w+I_{wvar} , I_w+I_{var} , $I+I_{wvar}$) et les sections composées (I_w+rail , $I_{wn}+rail$, $I+rail$, $I+2PL+rail$, $I+PL+rail$, $I+2L+rail$, $I+Ud+rail$) sont considérées comme des sections en I équivalentes asymétriques.

La formule M_{cr} utilise les paramètres suivants :

- C_1, C_2, C_3 : calculés conformément aux ENV, ECCS ou Lopez.
- Longueur de déversement LTB : $k_{LT} \cdot L$
- k et k_w : coefficients liés aux conditions de maintien
- z_g : position des charges
- z_j : asymétrie de la section

Davantage de détails sur chaque paramètres sont fournis dans des chapitres séparés.

Il est également possible de calculer M_{cr} par un calcul plus précis, un calcul du déversement au second ordre (LTBII). Cela est explicité plus loin dans ce chapitre.

▪ **Calcul des coefficients C_1 , C_2 et C_3**

Trois paramètres sont utilisés dans la formule générale pour M_{cr} :

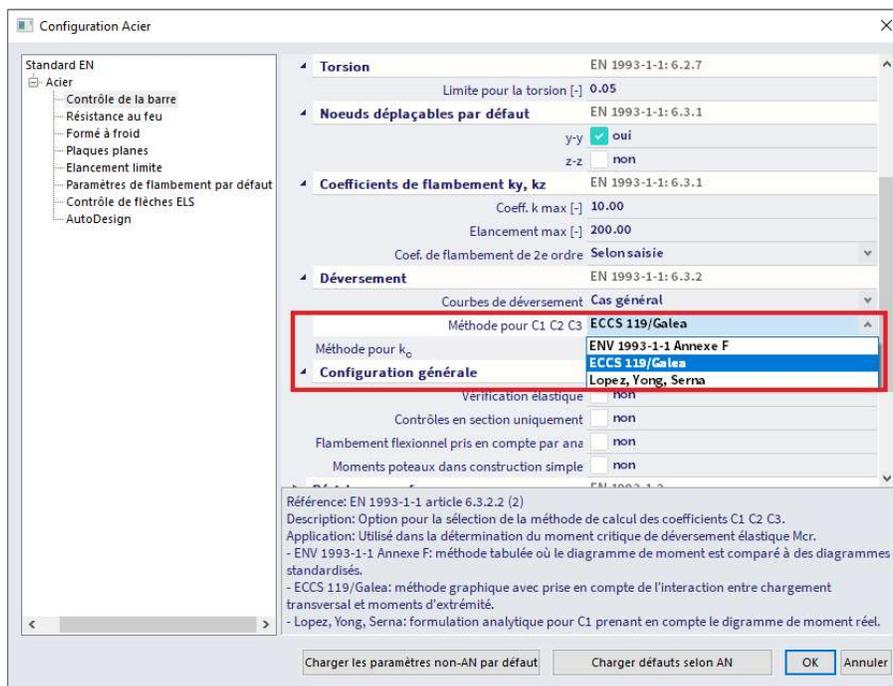
- C_1 tient compte de la forme du diagramme de moment,
- C_2 tient compte de la position de la charge,
- C_3 tient compte de l'asymétrie de la section

Les coefficients C_1 , C_2 , C_3 peuvent se calculer dans SCIA Engineer selon trois différentes méthodes :

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

Par défaut, la méthode de l'ECCS 119/Galea est appliquée. Les paragraphes suivants donne plus d'information sur ces méthodes.

Vous pouvez choisir entre ces trois méthodes dans le processus « Acier » et « Configuration Acier » :



ENV 1993-1-1Annexe F

Lorsque cette option est sélectionnée, les coefficients de moment seront déterminés conformément à l'ENV 1993-1-1 annexe F Ref.[5].

Pour déterminer ces coefficients (EN 1993-1-1 : C_1 , C_2 et C_3) pour le déversement (LTB), on utilise les tableaux standards.

La distribution des moments est comparée à des distributions de moments standards. La distribution de moments standard sont des lignes de moments générées par une charge répartie q , un effort aux nœuds F , ou bien où la ligne de moment atteint un maximum au début ou à la fin de la poutre.

La distribution de moments standard qui se trouve être la plus proche de la distribution du moment du modèle, est prise en compte pour le calcul des coefficients C_1 , C_2 et C_3 .

ECCS 119/Galea

Lorsque cette option est sélectionnée, les coefficients de moment seront déterminés conformément à l'ECCS 119 Annexe B Ref.[34].

Les données dans la référence pour C₁ et C₂ en cas de charge combinée proviennent de la Ref.[28], qui donne aussi en fait les valeurs tabulées de ces données de même qu'une gamme étendue.

La distribution des moments est comparée à des distributions de moments standards. La distribution de moments standard sont des lignes de moments générées par une charge répartie q, un effort aux nœuds F, ou bien où la ligne de moment atteint un maximum au début ou à la fin de la poutre.

La distribution de moments standard qui se trouve être la plus proche de la distribution du moment du modèle, est prise en compte pour le calcul des coefficients C₁ et C₂.

Galea ne donne les résultats que pour les coefficients C₁ et C₂. C₃ est pris dans l'ECCS 119 annexe B tableaux 63 et 64. C₃ est déterminé à partir du cas où la valeur de C₁ est la plus proche de la valeur du tableau.

Lopez, Yong, Serna

Lorsque cette option est sélectionnée, les coefficients de moment seront déterminés conformément à Lopez, Yong, Serna (Ref.[35]).

Avec cette méthode, les coefficients C₂ et C₃ sont pris à 0.

Le coefficient C₁ est calculé comme suit :

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

Avec :

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

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

$$A_2 = \left| \frac{M_1 + 2M_2 + 3M_3 + 4M_4 + 5M_5}{9 \cdot M_{\max}} \right|$$

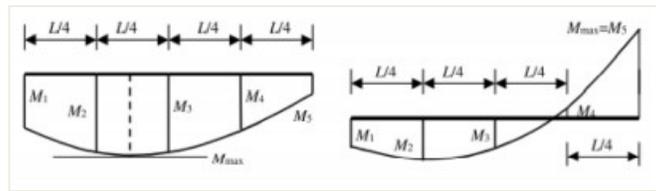
$$\alpha_1 = 1 - k_2$$

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

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

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

$$\alpha_5 = 1 - k_1$$



Et :

- k_1 pris égal à k_w
- k_2 pris égal à k_w
- $M_1 \Rightarrow M_5$ moments M_y déterminés dans les paramètres de flambement dans les sections données, comme montrés sur la figure ci-dessus. Ces moments sont déterminés en divisant la poutre en 10 parties (donc 11 sections) et en interpolant entre ces sections.
- M_{max} moment maximal M_y dans la référence du déversement.

La méthode n'est possible que si à la fois k et k_w sont égaux à 0,5 ou 1.

Comparaison des 3 méthodes de calcul

Ci-dessous un exemple dans SCIA Engineer dans lequel les trois méthodes sont calculées.

Exemple : Cfactors.esa

Dans la « Configuration Acier », la méthode de calcul pour les coefficients C a été modifiée. Ci-dessous un aperçu des résultats pour ces coefficients pour les trois méthodes :

EN 1993-1-1 Annexe F				ECCS 119/Galea				Lopez, Yong, Serna			
Paramètres M_{cr}				Paramètres M_{cr}				Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	l_{LT}	12.000	m	Longueur de déversement	l_{LT}	12.000	m	Longueur de déversement	l_{LT}	12.000	m
Infl. pos. des charges		stabilisant		Infl. pos. des charges		stabilisant		Infl. pos. des charges		stabilisant	
Coefficient de correction	k	1.00		Coefficient de correction	k	1.00		Coefficient de correction	k	1.00	
Coefficient de correction	k_w	1.00		Coefficient de correction	k_w	1.00		Coefficient de correction	k_w	1.00	
Coefficient de moment de déversement	C_1	1.89		Coefficient de moment de déversement	C_1	1.26		Coefficient de moment de déversement	C_1	1.20	
Coefficient de moment de déversement	C_2	0.33		Coefficient de moment de déversement	C_2	0.45		Coefficient de moment de déversement	C_2	0.00	
Coefficient de moment de déversement	C_3	2.64		Coefficient de moment de déversement	C_3	0.41		Coefficient de moment de déversement	C_3	0.00	
Distance au centre de cisaillement	d_z	0.00	mm	Distance au centre de cisaillement	d_z	0.00	mm	Distance au centre de cisaillement	d_z	0.00	mm
Distance du point d'application de la charge	z_g	-245.00	mm	Distance du point d'application de la charge	z_g	-245.00	mm	Distance du point d'application de la charge	z_g	-245.00	mm
Constante de mono-symétrie	β_y	0.00	mm	Constante de mono-symétrie	β_y	0.00	mm	Constante de mono-symétrie	β_y	0.00	mm
Constante de mono-symétrie	z_1	0.00	mm	Constante de mono-symétrie	z_1	0.00	mm	Constante de mono-symétrie	z_1	0.00	mm
$M_{cr} = 1576,03\text{kN.m}$				$M_{cr} = 1118,50\text{kN.m}$				$M_{cr} = 842,64\text{kN.m}$			

Comme on peut le constater, il peut y avoir une grande différence entre les trois méthodes de calcul.

Dans la méthode de « Lopez, Yong, Serna », les valeurs C_2 et C_3 sont toujours égaux à 0.

Lorsqu'on compare les coefficients C_1 , les méthodes de « ECCS 119/Galea » et de « Lopez, Yong, Serna » donnent approximativement les mêmes résultats (respectivement 1,26 et 1,20). Par contre le coefficient C_1 de la méthode de l' « EN1993-1-1 annexe F » donne une valeur totalement différente : 1,89.

Si on calculait M_{cr} de manière plus précise avec la méthode LTBII (cf le chapitre « Déversement avec la méthode LTBII »), on aurait 1169,66kN.m comme valeur pour M_{cr} sur l'élément B2. Donc le choix d'utiliser l'ECCS 119/Galea par défaut prend tout son sens.

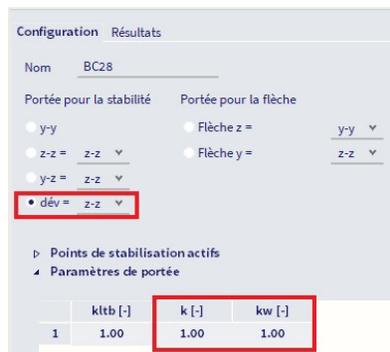
Paramètres de déversement			
Méthode pour la courbe de déversement		Cas général	
Module de section plastique	W_{ply}	3.9490e+06	mm ³
Moment critique élastique	M_{cr}	1169.66	kNm
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	0.89	
Elancement limite	$\lambda_{rel,LT,0}$	0.20	
Courbe de déversement		a	
Imperfection	α_{LT}	0.21	
Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.74	
Résistance de calcul au flambement	$M_{b,Rd}$	686.74	kNm
Contrôle unité		0.70	-

Note : le moment critique élastique M_{cr} est calculé en utilisant le solveur FriLo BTII.

▪ **Coefficients k et k_w**

On prend généralement l'hypothèse que $k = k_w = 1$, ce qui signifie que les extrémités de l'élément ne sont pas encastrées. Si les extrémités étaient encastrées, on pourrait alors utiliser des valeurs inférieures à 1 (généralement 0,5 pour un encastrement des deux côtés, ou 0,7 pour un seul côté encastré), et cela entraînerait des valeurs plus importantes de M_{cr} . Vous pouvez adapter les valeurs de k et k_w dans la fenêtre des « Longueurs de référence et paramètres de flambement ».

Sélectionnez l'élément et ouvrez la fenêtre des « Longueurs de référence et paramètres de flambement » dans les propriétés de l'élément. Sélectionnez « Dév » et dans les « Paramètres de portée », vous pouvez modifier les valeurs de k et k_w :



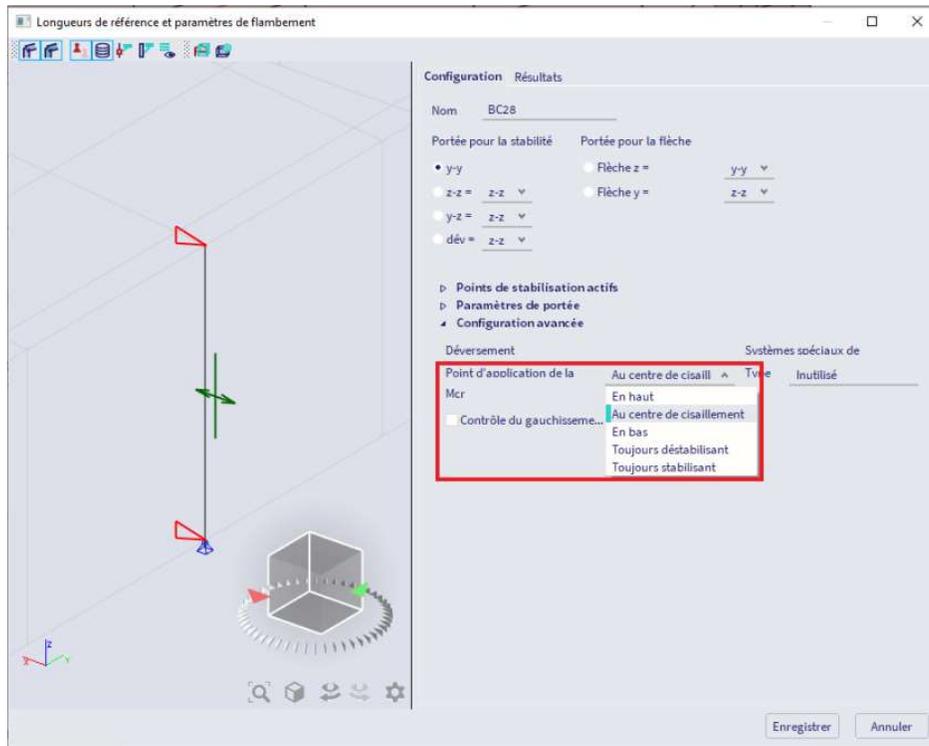
Dans le cas d'éléments en porte à faux, ces valeurs sont automatiquement modifiées par SCIA Engineer.

▪ **Position des charges**

La position des charges a une influence sur le calcul de M_{cr} à travers la valeur de z_g . Vous pouvez choisir parmi cinq positions de charges.

Si vous ouvrez la fenêtre « Longueurs de référence et paramètres de flambement », vous pouvez voir une option appelée « Point d'application de la charge » dans la « Configuration avancée ». Il y a 5 possibilités :

- « En haut » : la charge est appliquée sur l'aile supérieure.
- « Au centre de cisaillement » : la charge est appliquée au centre de cisaillement.
- « En bas » : la charge est appliquée sur l'aile inférieure.
- « Toujours déstabilisant » : la charge est appliquée sur l'aile déstabilisante.
- « Toujours stabilisant » : la charge est appliquée sur l'aile stabilisante.

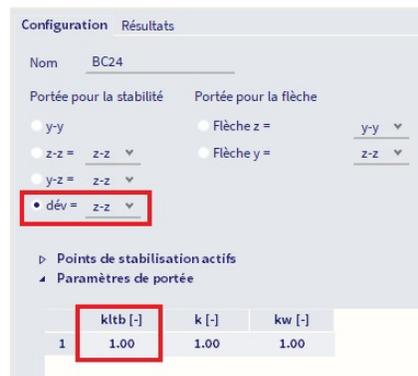


La valeur est par défaut sur « Au centre de cisaillement » et peut être adaptée pour influencer la valeur de M_{cr} .

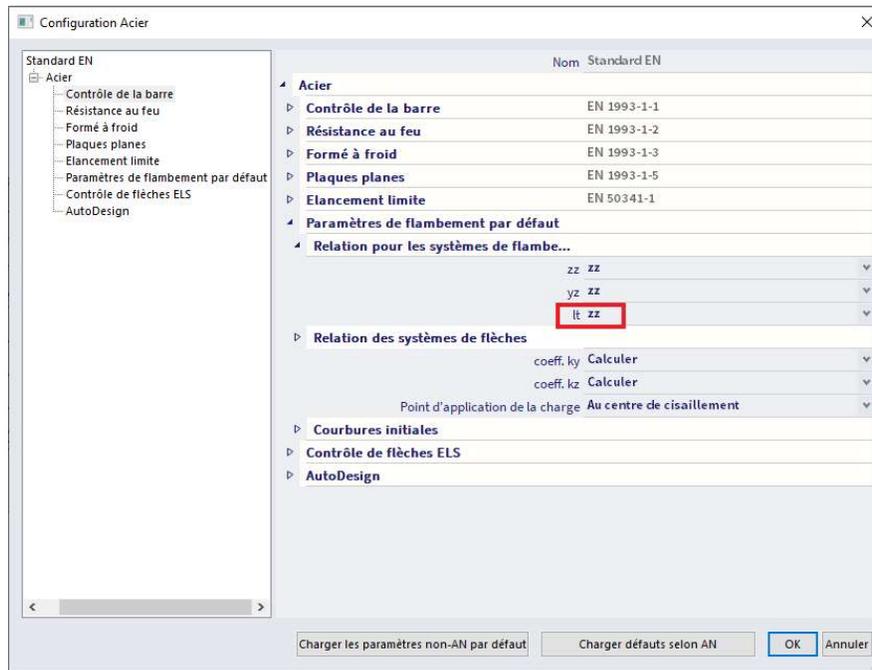
▪ **Longueur L_{TB}**

La longueur de déversement est calculée comme suit : $l_{LTB} = k_{LTB} * L_{LTB}$

k_{LTB} est par défaut pris égal à 1. Une valeur plus petite peut être utilisée pour réduire la longueur de déversement. Vous pouvez adapter k_{LTB} dans la fenêtre des « Longueurs de référence et paramètres de flambement » :



L_{LTB} est la longueur de référence. Elle est par défaut égale à la longueur de référence autour de l'axe faible (L_z) pour à la fois l'aile supérieure et l'aile inférieure. Cela peut être visualisé dans la fenêtre précédente mais aussi la « Configuration Acier » :



La longueur de référence peut être annulée par une autre valeur en utilisant les « Appuis déversement ». Ces maintiens permettent de définir des conditions différentes pour l'aile supérieure et pour l'aile inférieure.

- **Annexe nationale néerlandaise**

L'annexe nationale néerlandaise de l'EN 1993-1-1 donne une autre formule (NB.NB.2) pour calculer M_{cr} :

$$M_{cr} = k_{red} * \frac{C}{L_g} * \sqrt{E * I_z * G * I_t}$$

SCIA Engineer suit cette méthode lorsque l'annexe nationale néerlandaise est utilisée.

Exemple : Cfactors.esa

Ouvrir le projet et sélectionner l'annexe nationale hollandaise dans le gestionnaire des annexes nationales, puis recalculer le projet.

Le contrôle ELU pour la poutre B1 affiche maintenant la vérification au déversement avec M_{cr} calculé conformément à l'annexe nationale néerlandaise :

Contrôle de déversement

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 & 6.3.2.2 et formule (6.54)

Paramètres de déversement			
Méthode pour la courbe de déversement		Cas général	
Module de section plastique	$W_{pl,y}$	3.9490e+06	mm ³
Moment critique élastique	M_{cr}	1143.93	kNm
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	0.90	
Elancement limite	$\lambda_{rel,LT,0}$	0.20	
Courbe de déversement		a	
Imperfection	α_{LT}	0.21	
Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.73	
Résistance de calcul au flambement	$M_{b,Rd}$	680.68	kNm
Contrôle unité		0.71	-

Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	l_{LT}	12.000	m
Portée entre fourches	L_g	12.000	m
Infl. pos. des charges		stabilisant	
Coefficient	α	575.00	
Coefficient de réduction	k_{red}	1.00	
Coefficient	C	5.89	
Coefficient	S	2177.97	mm
Coefficient de moment de déversement	C_1	1.27	
Coefficient de moment de déversement	C_2	0.51	

Note: M_{cr} a été calculé selon l'AN néerlandaise NEN-EN.

L'annexe nationale néerlandaise mentionne aussi les conditions qui doivent être satisfaites pour appliquer cette méthode :

Bijlage NB.NB (normatief) Het kritisch elastische kippmoment	
NB.NB.1 Toepassingsgebied	
(1)	De in deze bijlage gegeven rekenregels voor het kritieke elastische kippmoment zijn van toepassing voor: <ul style="list-style-type: none"> — dubbel-symmetrische I-vormige doorsneden waarbij de belasting niet hoger dan 0,1 maal de hoogte van het profiel boven de bovenflens aangrijpt; — buisprofielen waarvoor geldt: $h / b > 3$, waarbij de belasting niet hoger dan 0,1 maal de hoogte van het profiel boven de bovenflens aangrijpt. <p>OPMERKING Voor buisprofielen waarvoor geldt $h / b \leq 3$ mag zijn aangenomen dat ze niet gevoelig zijn voor kippstabiliteit.</p>
(2)	Het toepassingsgebied van de in deze bijlage gegeven rekenregels is beperkt tot staven die zijn begrensd door gaffels of zijn opgelegd met onderflensinklemmingen die voldoen aan het gestelde in 6.3.2.5 en waarbij de verhouding van de lengte van de staaf tussen de gaffels L_g en de hoogte h van het profiel groter is dan of gelijk is aan 5 ofwel: $L_g / h \geq 5$.
(3)	Als geldt $L_g / h < 5$, dan moet dezelfde toetsingsprocedure zijn gevolgd als wanneer $\alpha > 5\ 000$. Hiervoor geldt NB.NB.4.2(3).

Lorsque l'une des conditions n'est pas remplie, SCIA reverra un avertissement (W30) et la méthode de l'Eurocode sera par défaut utilisée.

5.4.2. Contrôle du déversement

- **Cas général**

Le contrôle au déversement sera effectué selon l'EN 1993-1-1 art. 6.3.2

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

Avec :

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$W_y = W_{pl,y}$ pour les sections de classes 1 et 2

$W_y = W_{el,y}$ pour les sections de classes 3

$W_y = W_{eff,y}$ pour les sections de classes 4

Le facteur de réduction χ_{LT} sera calculé comme suit :

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

Mais :

$$\chi \leq 1,0$$

Avec :

$$\Phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

M_{cr} : moment de flexion critique

α : coefficient d'imperfection qui dépend des courbes de flambement :

Courbe de déversement	a	b	c	d
Facteur d'imperfection α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Avec les recommandations pour le choix des courbes de déversement :

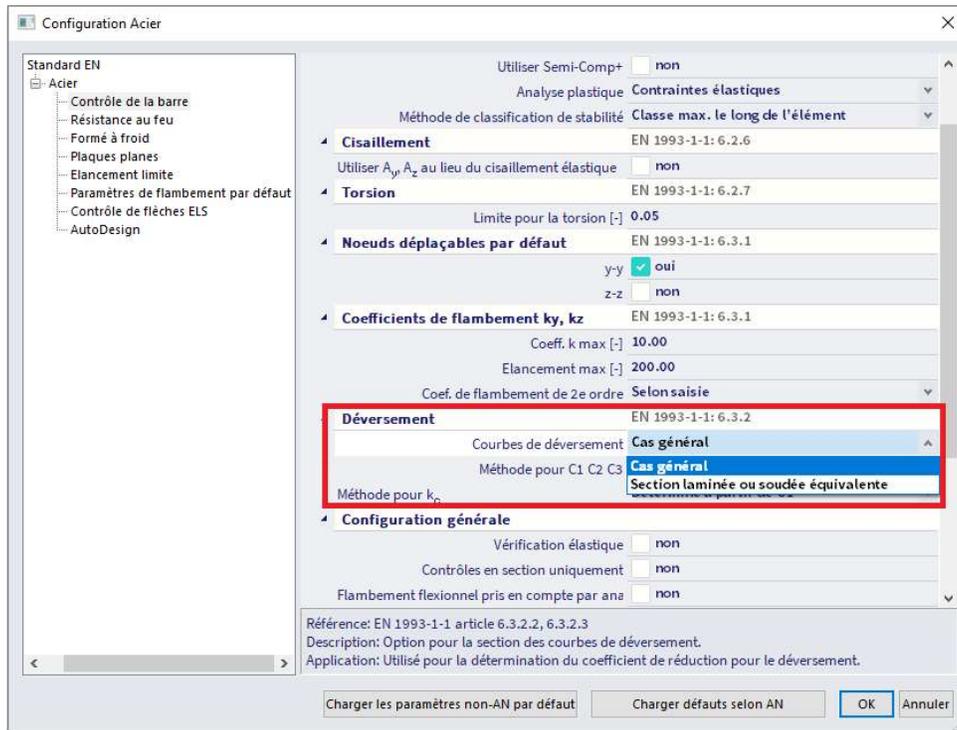
Sections transversales	Limites	Courbe de déversement
Sections en I laminées	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Sections en I soudées	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Autres sections	—	d

Lorsque l'élanement $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2$ ou bien pour $M_{Ed}/M_{cr} \leq 0,2^2$, alors les effets du déversement peuvent être ignorés.

▪ **Déversement pour les sections laminées ou sections soudées équivalentes**

Dans l'EN 1993-1-1, une distinction dans le déversement est faite pour les cas généraux et pour les sections laminées ou soudées équivalentes. La théorie dans l'ECCS – n°119 spécifie clairement que cela n'est valide que pour les sections en I ou les sections avec une forme comparable.

La distinction peut aussi être choisie dans SCIA Engineer par le processus « Acier » / « Configuration Acier », et peut être choisie pour toutes les poutres :



Avec cette option, le coefficient de réduction pour le déversement est calculé de manière un peu différente :

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

Mais :

$$\chi \leq 1,0$$

et

$$\chi \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}$$

Avec :

$$\Phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ (valeur maximale)}$$

$$\beta = 0,75 \text{ (valeur minimale)}$$

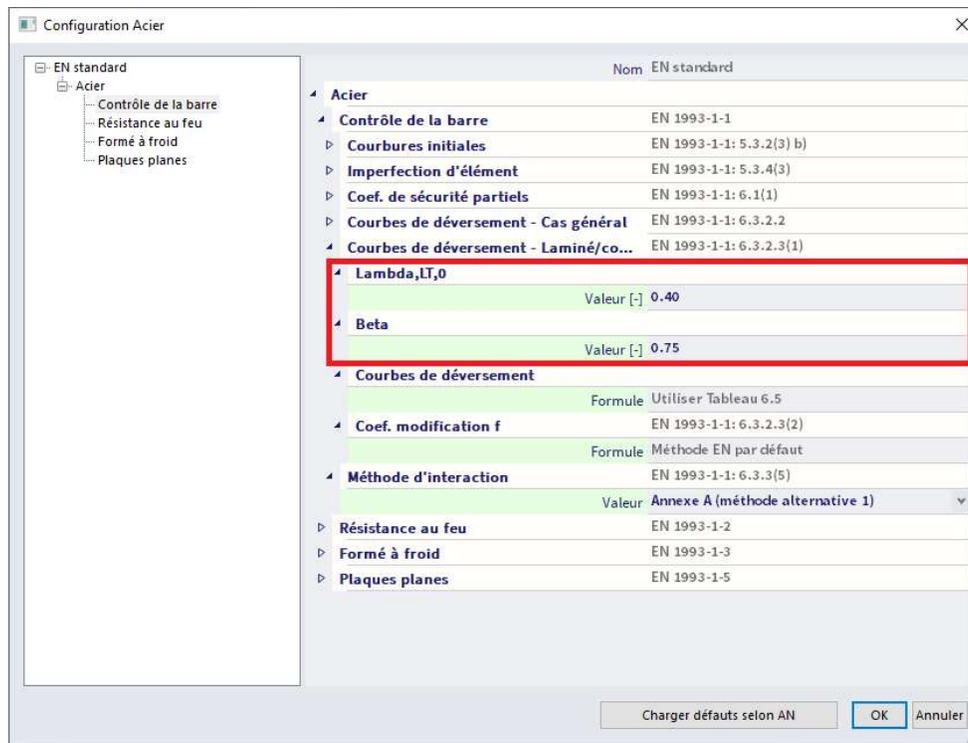
Avec les recommandations pour le choix des courbes de déversement :

Tableau 6.5 — Courbes de déversement recommandées pour une section transversale lorsque l'expression (6.57) est utilisée

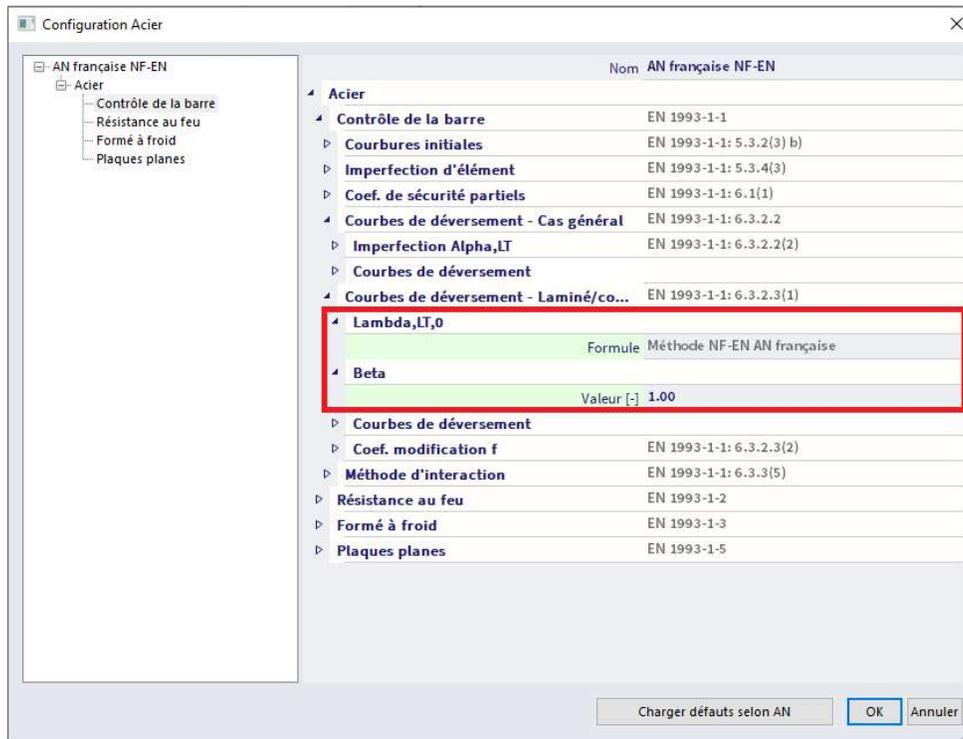
Sections transversales	Limites	Courbe de déversement
Sections en I laminées	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
Sections en I soudées	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Lorsque l'élançement $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ ou bien pour $M_{Ed}/M_{cr} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$, alors les effets du déversement peuvent être ignorés.

Conformément à l'EN 1993-1-1 article 6.3.2.3 : $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$. Mais cela peut être adapté dans l'annexe nationale d'un pays dans SCIA Engineer si vous choisissez l'annexe nationale « Standard » :



Par contre, la valeur de β peut également être modifiée, même dans l'annexe nationale française :



Le coefficient de réduction χ_{LT} peut être modifié comme suit :

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}$$

Le paramètre « f » peut être défini dans l'annexe nationale. Les valeurs minimales suivantes sont recommandées :

$$f = 1 - \left\{ 0,5 * (1 - k_c) * \left[1 - 2,0 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \right\}$$

Mais :

$$f \leq 1,0$$

Avec k_c pris par défaut dans le tableau suivant :

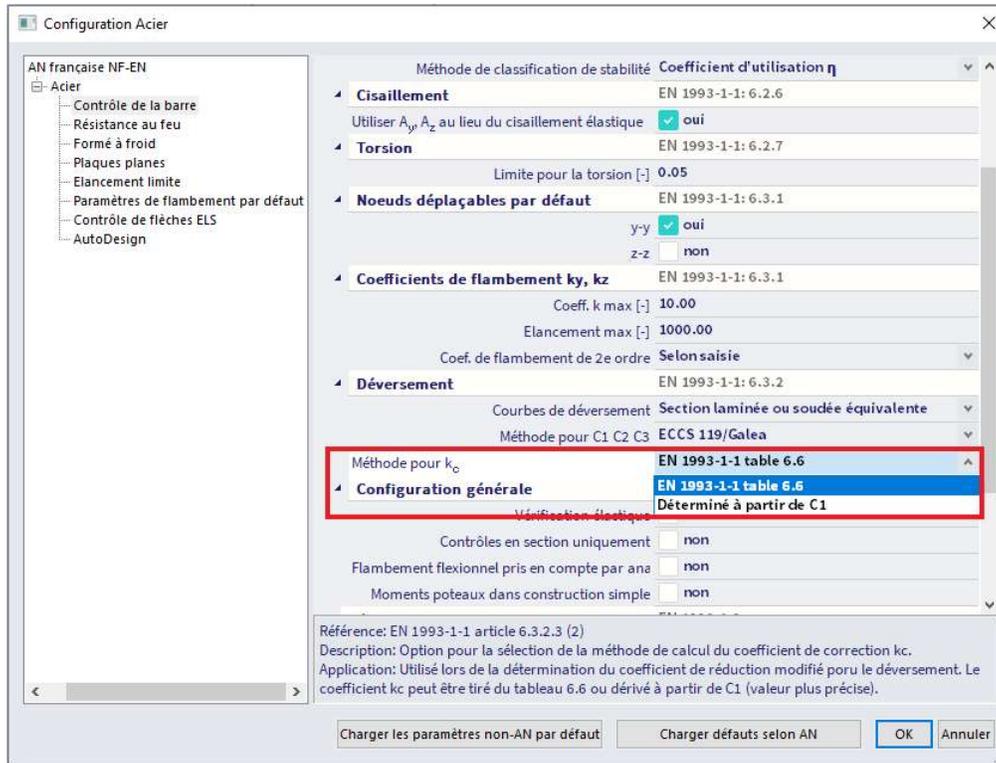
Tableau 6.6 — Facteurs de correction k_c

Distribution des moments	k_c
$\psi = 1$	1,0
$-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

Mais k_c peut aussi être calculé à partir du coefficient C_1 :

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}}$$

Dans SCIA Engineer, vous pouvez choisir entre la méthode standard ou le calcul de k_c en fonction de C_1 (par défaut k_c sera pris du tableau 6.6) dans le processus « Acier » / « Configuration Acier » :



Ce contrôle au déversement sera également effectué dans SCIA Engineer.

Exemple : Industrial Hall.esa

Regardons l'élément poutre B114.

La méthode par défaut pour le calcul des coefficients C a été utilisée. C'est aussi indiqué dans l'aperçu des résultats.

Tout d'abord, les paramètres pour le contrôle de déversement seront présentés :

Contrôle de déversement

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 & 6.3.2.2 et formule (6.54)

Paramètres de déversement			
Méthode pour la courbe de déversement		Cas général	
Module de section plastique	$W_{pl,y}$	3.6380e+05	mm ³
Moment critique élastique	M_{cr}	56.14	kNm
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	1.23	
Elancement relatif	$\lambda_{rel,T}$	0.07	
Elancement relatif	$\lambda_{rel,EXTRA}$	1.31	
Elancement limite	$\lambda_{rel,LT,0}$	0.20	
Courbe de déversement		a	
Imperfection	α_{LT}	0.21	
Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.47	
Résistance de calcul au flambement	$M_{b,Rd}$	39.92	kNm
Contrôle unité		0.15	-

Note: $\lambda_{rel,EXTRA}$ est déterminé selon "Design rule for lateral torsional buckling of channel sections, 2007".

 Puis on trouvera les paramètres pour le calcul du M_{cr} :

Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	l_{LT}	6.000	m
Infl. pos. des charges		pas d'influence	
Coefficient de correction	k	1.00	
Coefficient de correction	k_w	1.00	
Coefficient de moment de déversement	C_1	1.13	
Coefficient de moment de déversement	C_2	0.45	
Coefficient de moment de déversement	C_3	0.53	
Distance au centre de cisaillement	d_z	0.00	mm
Distance du point d'application de la charge	z_g	0.00	mm
Constante de mono-symétrie	β_y	0.00	mm
Constante de mono-symétrie	z_j	0.00	mm

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_x}{l_{LT}^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_x}{I_y} + \frac{l_{LT}^2 \times G \times I_x}{\pi^2 \times E \times I_x} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right] = 1.13$$

$$\times \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 2.4800 \cdot 10^9[\text{mm}^4]}{6.000[\text{m}]^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{1.00}{1.00}\right)^2 \times \frac{2.5514 \cdot 10^{10}[\text{mm}^4]}{2.4800 \cdot 10^9[\text{mm}^4]} + \frac{6.000[\text{m}]^2 \times 80769.2[\text{MPa}] \times 1.9700 \cdot 10^5[\text{mm}^4]}{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 2.4800 \cdot 10^9[\text{mm}^4]} + (0.45 \times 0.00[\text{mm}] - 0.53 \times 0.00[\text{mm}])^2} - (0.45 \times 0.00[\text{mm}] - 0.53 \times 0.00[\text{mm}]) \right]$$

$$= 56.14[\text{kNm}]$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{3.6380 \cdot 10^5[\text{mm}^3] \times 235.0[\text{MPa}]}{56.14[\text{kNm}]} = 1.23$$

$$\lambda_{rel,T} = 0.43 - 0.29 \times \lambda_{rel,LT} = 0.43 - 0.29 \times 1.23 = 0.07$$

$$\lambda_{rel,EXTRA} = \lambda_{rel,LT} + \lambda_{rel,T} = 1.23 + 0.07 = 1.31$$

$$\chi_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,EXTRA}^2}}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.47 + \sqrt{1.47^2 - 1.31^2}}, 1 \right) = \min(0.47, 1) = 0.47 \quad (\text{EC3-1-1: 6.56})$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0.47 \times 3.6380 \cdot 10^5[\text{mm}^3] \times \frac{235.0[\text{MPa}]}{1.00} = 39.92[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.55})$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{|M_{y,Ed}|}{M_{b,Rd}} = \frac{6.01[\text{kNm}]}{39.92[\text{kNm}]} = 0.15 \leq 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.54})$$

Note: Les paramètres C sont déterminés selon l'ECSS 119 2006 / Galea 2002.

Note : A la fin de l'aperçu de ce contrôle, la méthode de calcul pour les paramètres C est indiquée.

▪ **Déversement pour les sections en C**

Dans le cas d'une section en C, une torsion additionnelle apparaît à cause de l'excentricité du centre de cisaillement par rapport au centre de gravité de la section. Pour cette raison, la valeur de M_{cr} doit être adaptée.

Pour prendre en compte cet effet de torsion additionnelle, la procédure suivante peut être utilisée, avec le calcul de λ_{EXTRA} .

Règle de calcul modifiée pour le déversement des sections en C

Dans le cas où ce paramétrage est activé dans la « Configuration Acier », le coefficient de réduction pour le déversement des sections en C est déterminé selon la Ref.[22].

Plus particulièrement, le calcul est fait comme suit.

Le coefficient de réduction est de :

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{EXTRA}^2}}$$

Avec :

$$\Phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\lambda_{EXTRA} - 0,2) + \lambda_{EXTRA}^2]$$

Courbe « a » pour les sections en C, toutefois $\alpha_{LT} = 0,21$

$$\lambda_{EXTRA} = \lambda_{Lt} + \lambda_T$$

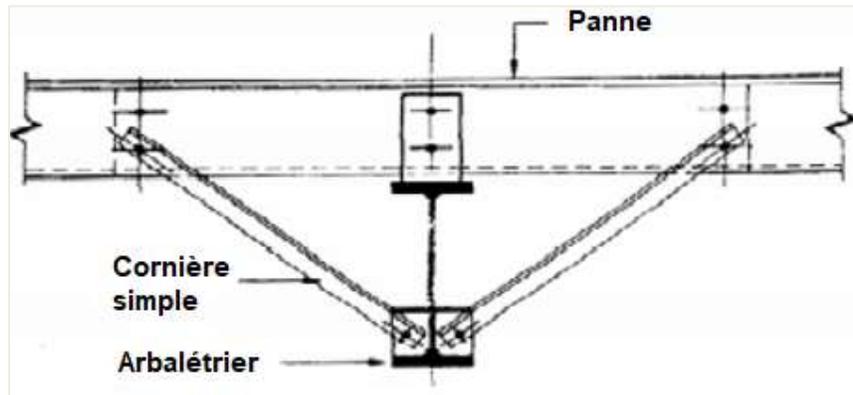
$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl,y}}{M_{cr,y}}}$$

$\lambda_T = 1 - \lambda_{LT}$	si	$0,50 \leq \lambda_{LT} < 0,80$
$\lambda_T = 0,43 - 0,29 \cdot \lambda_{LT}$	si	$0,80 \leq \lambda_{LT} < 1,50$
$\lambda_T = 0$	si	$\lambda_{LT} > 1,50$

Cette règle de calcul modifiée ne s'applique que lorsque les conditions suivantes sont satisfaites :

- La section concerne une section en C (code forme 5)
- Le cas général est utilisé (pas le cas des sections laminées et des sections soudées équivalentes)
- $15 \leq L_{itb}/h \leq 40$ (avec L_{itb} la longueur de déversement et h la hauteur de la section).

5.4.3. Appuis déversement



Dans SCIA Engineer, des appuis déversement peuvent être saisis. Ces maintiens modifieront la longueur de déversement, utilisée dans le calcul de M_{cr} :

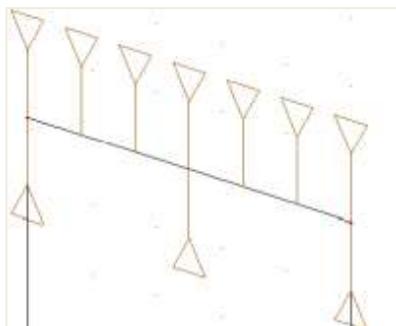
$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 E I_z}{(k_{LT} \cdot L)^2} \cdot \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_{LT} \cdot L)^2 \cdot G I_t}{\pi^2 E I_z} + (c_2 z_g - c_3 z_j)^2} - [c_2 z_g - c_3 z_j] \right\}$$

Où $(k_{LT} \cdot L)$ est la longueur de déversement de la poutre deux points qui ont un maintien latéral.

La longueur sera prise comme la distance entre deux appuis au déversement.

Les appuis déversement sont définis sur la partie supérieure ou sur la partie inférieure de l'aile. Les longueurs de déversement pour l'aile comprimée sont prises égales aux distances entre deux maintiens. Les coefficients de moments de déversement sont calculés entre ces maintiens.

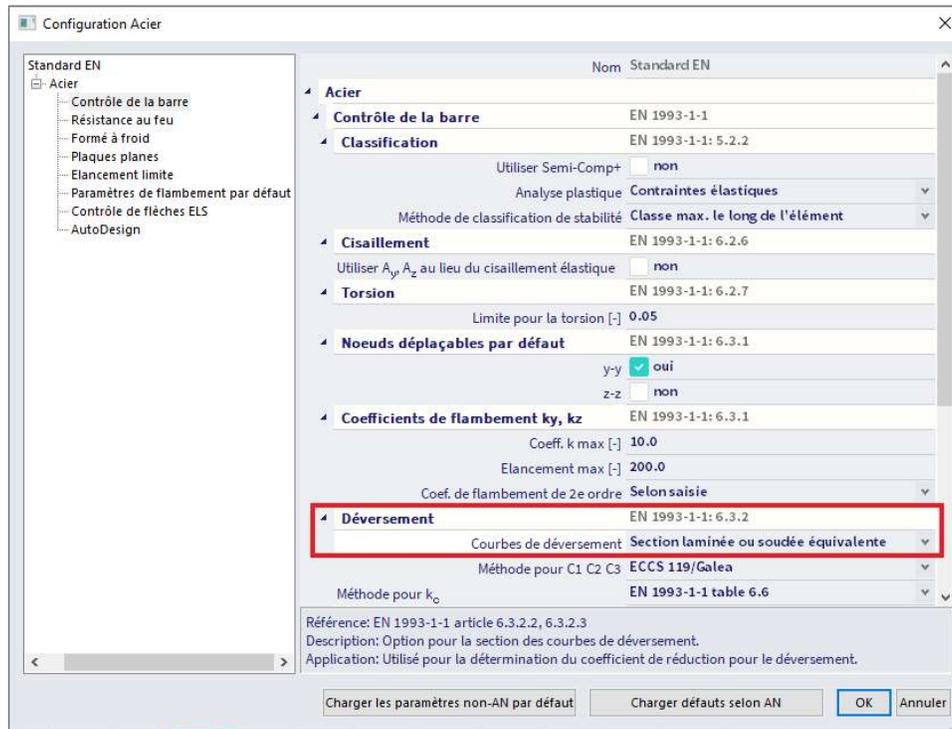
Les maintiens peuvent être saisis via le processus « Acier » / « Contraintes de déversement de l'acier ».



Note : seuls les maintiens sur l'aile comprimée sont pris en compte.

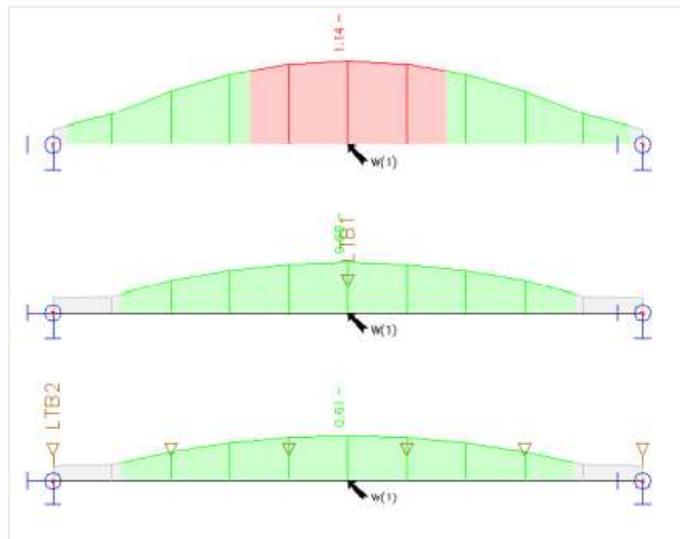
Exemple : LTB_Restraints.esa

Dans cet exemple, la même poutre a été saisie trois fois. Comme il s'agit dans cet exemple d'un IPE450, les « Courbes de déversement » dans la « Configuration Acier » ont été mises sur « Section laminée ou soudée équivalente » :



Note : le paramètre général pour les courbes de déversement est le « Cas général ».

Les résultats pour LC1 sont :



B1				B2			
Contrôle de déversement				Contrôle de déversement			
Selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 & 6.3.2.3 et formule (6.54)				Selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 & 6.3.2.3 et formule (6.54)			
Paramètres de déversement				Paramètres de déversement			
Méthode pour la courbe de déversement		Cas alternatif		Méthode pour la courbe de déversement		Cas alternatif	
Module de section plastique	$W_{pl,y}$	1.7020e-03	m ³	Module de section plastique	$W_{pl,y}$	1.7020e-03	m ³
Moment critique élastique	M_{cr}	280.68	kNm	Moment critique élastique	M_{cr}	972.64	kNm
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	1.19		Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	0.64	
Paramètres de déversement				Paramètres de déversement			
Elancement limite	$\lambda_{rel,LT,0}$	0.40		Elancement limite	$\lambda_{rel,LT,0}$	0.40	
Courbe de déversement		c		Courbe de déversement		c	
Imperfection	α_{LT}	0.49		Imperfection	α_{LT}	0.49	
Coefficient de déversement	β	0.75		Coefficient de déversement	β	0.75	
Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.53		Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.86	
Coefficient de correction	k_c	0.94		Coefficient de correction	k_c	0.91	
Coefficient de correction	f	0.98		Coefficient de correction	f	0.96	
Coefficient de réduction modifié	$\chi_{LT,mod}$	0.54		Coefficient de réduction modifié	$\chi_{LT,mod}$	0.90	
Résistance de calcul au flambement	$M_{b,Rd}$	215.74	kNm	Résistance de calcul au flambement	$M_{b,Rd}$	359.89	kNm
Contrôle unité		1.14	-	Contrôle unité		0.68	-
Paramètres M_{cr}				Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	l_{LT}	7.000	m	Longueur de déversement	l_{LT}	3.500	m
Infl. pos. des charges		pas d'influence		Infl. pos. des charges		pas d'influence	
Coefficient de correction	k	1.00		Coefficient de correction	k	1.00	
Coefficient de correction	k_w	1.00		Coefficient de correction	k_w	1.00	
Coefficient de moment de déversement	C_1	1.13		Coefficient de moment de déversement	C_1	1.33	
Coefficient de moment de déversement	C_2	0.45		Coefficient de moment de déversement	C_2	0.12	
Coefficient de moment de déversement	C_3	0.53		Coefficient de moment de déversement	C_3	1.00	
Distance au centre de cisaillement	d_z	0	mm	Distance au centre de cisaillement	d_z	0	mm
Distance du point d'application de la charge	z_g	0	mm	Distance du point d'application de la charge	z_g	0	mm
Constante de mono-symétrie	β_y	0	mm	Constante de mono-symétrie	β_y	0	mm
Constante de mono-symétrie	z_j	0	mm	Constante de mono-symétrie	z_j	0	mm

Et pour la poutre B3, 6 appuis déversement ont été saisis, donc aucun calcul au déversement n'est effectué.

En effet, les effets du déversement peuvent être ignorés, si :

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$$

Ou pour :

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$$

Avec :

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Donc pour la poutre B3, le contrôle au déversement suivant s'affiche :

Contrôle de déversement

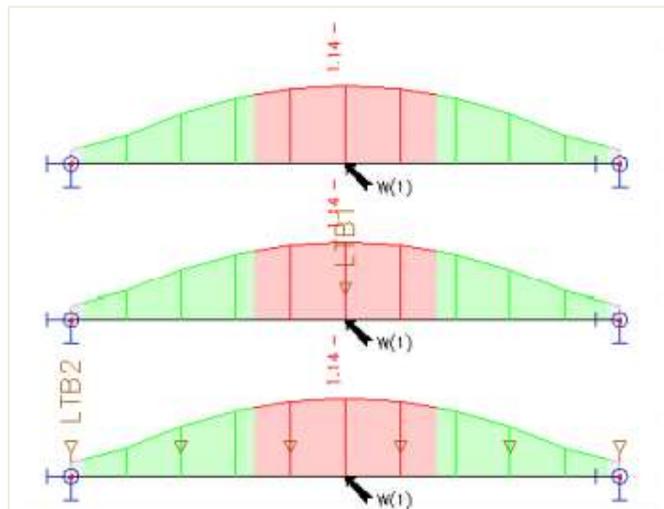
Selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 & 6.3.2.3 et formule (6.54)

Paramètres de déversement			
Méthode pour la courbe de déversement		Cas alternatif	
Module de section plastique	W_{ply}	1.7020e-03	m ³
Moment critique élastique	M_{cr}	4017.35	kNm
Élancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	0.32	
Élancement limite	$\lambda_{rel,LT,0}$	0.40	

Note: L'élancement et le moment de flexion sont tels que les effets de déversement peuvent être négligés conformément à EN 1993-1-1 article 6.3.2.2(4).

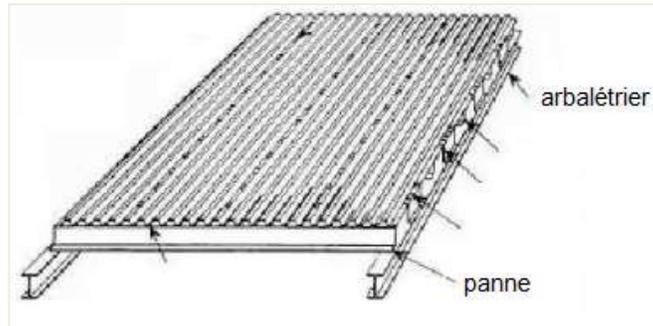
Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	l_{LT}	1.400	m
Infl. pos. des charges		pas d'influence	
Coefficient de correction	k	1.00	
Coefficient de correction	k_w	1.00	
Coefficient de moment de déversement	C_1	1.01	
Coefficient de moment de déversement	C_2	0.02	
Coefficient de moment de déversement	C_3	1.00	
Distance au centre de cisaillement	d_z	0	mm
Distance du point d'application de la charge	z_g	0	mm
Constante de mono-symétrie	β_y	0	mm
Constante de mono-symétrie	z_j	0	mm

Si on regarde le cas de charges LC2, la face supérieure de la poutre sera sous tension, alors SCIA Engineer ne tiendra pas compte des effets des appuis déversement :

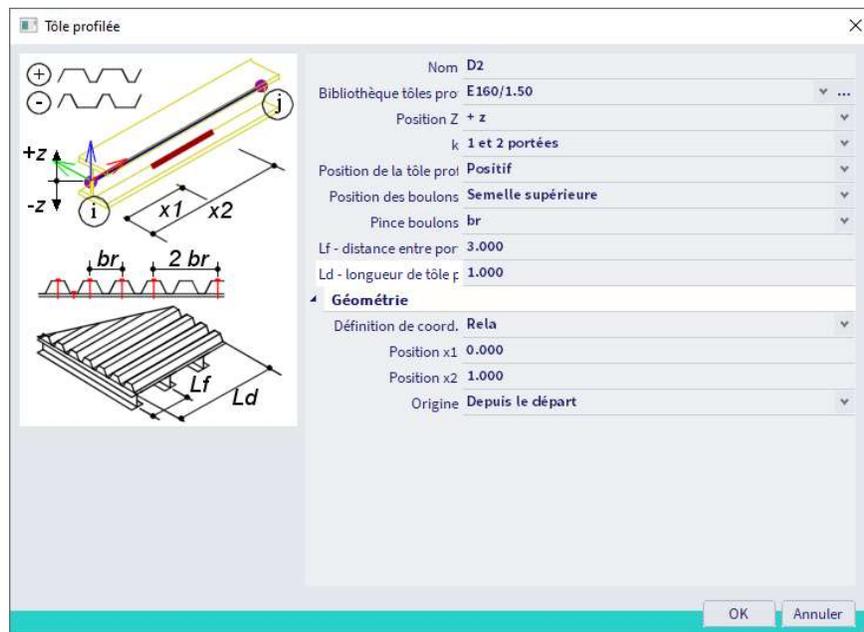


5.4.4. Tôle profilée

Lorsque des diaphragmes (tôles profilées) sont utilisés, l'inertie de torsion I_t est adaptée pour les sections en I symétriques ou asymétriques, les sections en C, les sections en Z, et les sections en U, C et Z formés à froid.



Une tôle profilée peut être saisie dans SCIA Engineer via le processus « Acier », puis « Tôle profilée » :



Les paramètres pour le diaphragme sont :

- « Bibliothèque tôles profilées » : avec cette option, vous pouvez choisir entre les différents types de tôles profilées de la bibliothèque de SCIA Engineer, ou bien saisir votre propre tôle.
- « Position z » : position de la tôle selon le SCL de la poutre.
- « k » : la valeur de ce coefficient dépend du nombre de travées de la tôle :
 - o k = 2 pour 1 ou 2 travées
 - o k = 4 pour 3 ou plus de 3 travées
- « Position de la tôle profilée » : la position peut être ou bien positive ou bien négative :
 - o Positive signifie que la tôle est assemblée de manière à ce que la largeur soit plus grande en face supérieure.
 - o Négative signifie que la tôle est assemblée de manière à ce que la largeur soit plus grande en face inférieure.

- « Position des boulons » : les boulons peuvent être situés ou bien sur la face supérieure ou bien sur la face inférieure de la tôle.
- « Pince boulons » : les boulons peuvent être ou bien :
 - o Sur chaque nervure (c'est-à-dire « br »)
 - o Toutes les deux nervures (c'est-à-dire « 2 br »)
- « Distance entre portiques » : distance entre portiques.
- « Longueur de tôle profilée » : longueur de la tôle.

La tôle profilée n'aura une influence que sur l'inertie de torsion I_t et sera prise en compte dans le calcul de M_{cr} pour le contrôle du déversement.

L'inertie de torsion I_t est mise à jour avec la raideur de la tôle profilée.

La valeur pour I_t est égale à la valeur précédente de I_t (c'est-à-dire I_t de la poutre), avec une raideur supplémentaire calculée via les valeurs de la tôle profilée :

$$I_{t,id} = I_t + \text{vorh} C_\theta \cdot \frac{l^2}{\pi^2 G}$$

Avec :

$$\frac{1}{\text{vorh} C_\theta} = \frac{1}{C_{\theta M,k}} + \frac{1}{C_{\theta A,k}} + \frac{1}{C_{\theta P,k}}$$

$$C_{\theta M,k} = k \cdot \frac{E \cdot I_{eff}}{s}$$

$$C_{\theta A,k} = C_{100} * \left[\frac{b_a}{100} \right]^2 \quad \text{si } b_a \leq 125$$

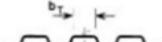
$$C_{\theta A,k} = 1,25 * C_{100} * \left[\frac{b_a}{100} \right] \quad \text{si } 125 < b_a < 200$$

$$C_{\theta P,k} \approx \frac{3EI_s}{(h - t)}$$

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

Et :

l	longueur de déversement
G	module de cisaillement
$\text{vorh} C_\theta$	raideur réelle en rotation de la tôle profilée
$C_{\theta M,k}$	raideur en rotation de la tôle profilée
$C_{\theta A,k}$	raideur en rotation de l'attache entre la tôle et la poutre
k	coefficient numérique
	= 2 pour une travée simple ou pour deux travées de tôle
	= 4 pour 3 ou plus de 3 travées de tôle
$E \cdot I_{eff}$	raideur en flexion par unitaire de largeur de tôle
s	espacement de la poutre
b_a	largeur de l'aile de la poutre (mm)
C_{100}	coefficient de rotation – cf tableau ci-dessous
h	hauteur de la poutre
t	épaisseur de l'aile de la poutre
s	épaisseur de l'âme de la poutre

Positioning of sheeting		Sheet fastened through		Pitch of fasteners		Washer diameter [mm]	C_{100} [kNm/m]	$b_{T,max}$ [mm]
Positive	Negative	Trough	Crest	$e = b_k$	$e = 2b_k$			
For gravity loading:								
×		×		×		22	5,2	40
×		×			×	22	3,1	40
	×		×	×		K_a	10,0	40
	×		×		×	K_a	5,2	40
	×	×		×		22	3,1	120
	×	×			×	22	2,0	120
For uplift loading:								
×		×		×		16	2,6	40
×		×			×	16	1,7	40
Key:								
b_k is the corrugation width [185 mm maximum];								
b_T is the width of the sheeting flange through which it is fastened to the purlin.								
K_a indicates a steel saddle washer as shown below with $t \geq 0,75$ mm						Sheet fastened:		
						- through the trough:		
								
The values in this table are valid for: - sheet fastener screws of diameter: $\phi = 6,3$ mm; - steel washers of thickness: $t_w \geq 1,0$ mm; - sheeting of nominal core thickness: $t \geq 0,66$ mm.						- through the crest:		
								

Exemple : Diaphragm.esa

Regardons l'élément poutre B1 :

- Longueur de déversement = 7m
- $C_1 = 1,13$; $C_2 = 0,45$; $C_3 = 0,53$
- $M_{cr} = 281$ kN.m

Regardons l'élément poutre B2 :

- $L_{t,id} = 1840207$ mm⁴
- Longueur de déversement = 7m
- $C_1 = 1,13$; $C_2 = 0,45$; $C_3 = 0,53$
- $M_{cr} = 405$ kN.m

Les résultats pour le calcul de la tôle sont présentés dans la sortie du contrôle ELU juste avant le contrôle de la section :

Tôle profilée

Selon EN 1993-1-1 article BB.2.1 et formule (BB.2)

Paramètres			
Nom de la tôle profilée		D1	
Moment d'inertie par unité de longueur	I	0.00	m ⁴ /m
Position Z		+ z	
Position de la tôle profilée		negatif	
Position des boulons		semelle supérieure	
Pince boulons		br	
Distance entre portiques	L_f	3.000	m
Longueur de l'élément de tôle profilée	L_d	3.000	m
Coefficient de tôle profilée	K_1	0.167	m/kN
Coefficient de tôle profilée	K_2	15.700	m ² /kN
Coefficient numérique	k	4.00	

Rigidité			
Rigidité effective	S	5555.21	kN
Rigidité requise	S _{erf}	42650.44	kN
S < S _{erf}		insuffisamment stabilisé	
Tôle profilée sur le côté		côté comprimé	
Rigidité rotationnelle (tôle profilée)	C _{θM,k}	2637.60	kNm/m
Rigidité rotationnelle (distorsion de poutre)	C _{θP,k}	100.15	kNm/m
Rigidité rotationnelle (connection)	C _{θA,k}	23.75	kNm/m
Coefficient rotationnel	C ₁₀₀	10.00	kNm/m
Rigidité rotationnelle	vorhC _θ	19.06	kNm/m
Longueur de déversement	l _{LT}	7.000	m
Constante torsionnelle de section	I _t	6.6900e-07	m ⁴
Constante torsionnelle additionnelle	I _{t,add}	1.1715e-06	m ⁴
Constante de torsion ajustée	I _{t,id}	1.8405e-06	m ⁴

$$S = \frac{L_f \times 10000}{K_{1-} + \frac{K_{2-}}{L_d}} = \frac{3.000[m] \times 10000}{0.167[m/kN] + \frac{15.700[m^2/kN]}{3.000[m]}} = 5555.21[kN]$$

$$S_{erf} = \frac{\left(\frac{E \times I_w \times \pi^2}{I_{LT}^2} + G \times I_t + \frac{E \times I_z \times \pi^2}{I_{LT}^2} \times 0.25 \times h^2 \right) \times 70}{h^2}$$

$$= \frac{\left(\frac{210000.0[MPa] \times 7.9100 \cdot 10^{-7}[m^6] \times \pi^2}{7.000[m]^2} + 80769.2[MPa] \times 6.6900 \cdot 10^{-7}[m^4] + \frac{210000.0[MPa] \times 1.6760 \cdot 10^{-5}[m^4] \times \pi^2}{7.000[m]^2} \times 0.25 \times 450[mm]^2 \right) \times 70}{450[mm]^2}$$

$$= 42650.44[kN]$$

$$C_{\theta M,k} = \frac{k \times E \times I}{L_f} = \frac{4.00 \times 210000.0[MPa] \times 0.00[m^4/m]}{3.000[m]} = 2637.60[kNm/m]$$

$$C_{\theta P,k} = \frac{3 \times t_w^3 \times E}{12 \times (h - t_f)} = \frac{3 \times 9[mm]^3 \times 210000.0[MPa]}{12 \times (450[mm] - 15[mm])} = 100.15[kNm/m]$$

$$C_{\theta A,k} = C_{100} \times \frac{b}{0.1} \times 1.25 = 10.00[kNm/m] \times \frac{190[mm]}{0.1} \times 1.25 = 23.75[kNm/m]$$

$$C_{100} = 10.00[kNm/m]$$

$$vorhC_{\theta} = \frac{1}{\frac{1}{C_{\theta P,k}} + \frac{1}{C_{\theta A,k}} + \frac{1}{C_{\theta M,k}}} = \frac{1}{\frac{1}{100.15[kNm/m]} + \frac{1}{23.75[kNm/m]} + \frac{1}{2637.60[kNm/m]}} = 19.06[kNm/m]$$

$$I_{t,add} = \frac{vorhC_{\theta} \times I_{LT}^2}{\pi^2} = \frac{19.06[kNm/m] \times 7.000[m]^2}{\pi^2} = 1.1715 \cdot 10^{-6}[m^4]$$

$$I_{t,id} = I_t + I_{t,add} = 6.6900 \cdot 10^{-7}[m^4] + 1.1715 \cdot 10^{-6}[m^4] = 1.8405 \cdot 10^{-6}[m^4]$$

Les résultats pour le contrôle au déversement sont :

Contrôle de déversement
Selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 & 6.3.2.2 et formule (6.54)

Paramètres de déversement			
Méthode pour la courbe de déversement		Cas général	
Module de section plastique	W _{ply}	1.7020e-03	m ³
Moment critique élastique	M _{cr}	404.94	kNm
Elancement relatif	λ _{rel,LT}	0.99	
Elancement limite	λ _{rel,LT,0}	0.20	
Courbe de déversement		b	
Imperfection	α _{LT}	0.34	
Coefficient de réduction	χ _{LT}	0.60	
Résistance de calcul au flambement	M _{b,Rd}	240.36	kNm
Contrôle unité		1.02	-

Paramètres M _{cr}			
Longueur de déversement	l _{LT}	7.000	m
Infl. pos. des charges		pas d'influence	
Coefficient de correction	k	1.00	
Coefficient de correction	k _w	1.00	
Coefficient de moment de déversement	C ₁	1.13	
Coefficient de moment de déversement	C ₂	0.45	
Coefficient de moment de déversement	C ₃	0.53	
Distance au centre de cisaillement	d _z	0	mm
Distance du point d'application de la charge	z _g	0	mm
Constante de mono-symétrie	β _y	0	mm
Constante de mono-symétrie	z _j	0	mm

$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{l_{LT}^2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \times \frac{I_w}{I_z} + \frac{l_{LT}^2 \times G \times I_{t,td}}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j)^2} - (C_2 \times z_g - C_3 \times z_j) \right] = 1.13$$

$$\times \frac{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.6760 \cdot 10^{-5}[\text{m}^4]}{7.000[\text{m}]^2}$$

$$\times \left[\sqrt{\left(\frac{1.00}{1.00}\right)^2 \times \frac{7.9100 \cdot 10^{-7}[\text{m}^6]}{1.6760 \cdot 10^{-5}[\text{m}^4]} + \frac{7.000[\text{m}]^2 \times 80769.2[\text{MPa}] \times 1.8405 \cdot 10^{-6}[\text{m}^4]}{\pi^2 \times 210000.0[\text{MPa}] \times 1.6760 \cdot 10^{-5}[\text{m}^4]} + (0.45 \times 0[\text{mm}] - 0.53 \times 0[\text{mm}])^2} - (0.45 \times 0[\text{mm}] - 0.53 \times 0[\text{mm}]) \right]$$

$$= 404.94[\text{kNm}]$$

$$\lambda_{rel,LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1.7020 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times 235.0[\text{MPa}]}{404.94[\text{kNm}]} = 0.99$$

$$\chi_{LT} = \min \left(\frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \lambda_{rel,LT}^2}}, 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1.13 + \sqrt{1.13^2 - 0.99^2}}, 1 \right) = \min(0.60, 1) = 0.60 \quad (\text{EC3-1-1: 6.56})$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0.60 \times 1.7020 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3] \times \frac{235.0[\text{MPa}]}{1.00} = 240.36[\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.55})$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{|M_{y,Ed}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|245.00[\text{kNm}]|}{240.36[\text{kNm}]} = 1.02 > 1.00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.54})$$

Note: Les paramètres C sont déterminés selon l'EC3 119 2006 / Galea 2002.

5.4.5. Déversement utilisant LTBII

Cette option a été implémentée dans SCIA Engineer comme un module séparé, et il n'est inclus que dans l'édition « Ultime ». Le module nécessaire pour cette option est **esasd.14 (ou sensd.07)**.

Pour une analyse en déversement détaillée, un lien a été fait avec le programme de calcul LTBII Friedrich + Lochner.

LTBII est l'abréviation de « Calcul du déversement avec second ordre ».

Le solveur Frilo LTBII peut être utilisé de deux manières séparées :

- Calcul de M_{cr} à travers les modes propres
- Calcul au second ordre incluant les effets de torsion et de gauchissement

Pour ces deux méthodes, l'élément étudié est envoyé vers le solveur Frilo LTBII et les résultats respectifs sont retournés vers SCIA Engineer.

L'élément est retiré de la structure et est considéré comme une poutre simple, avec :

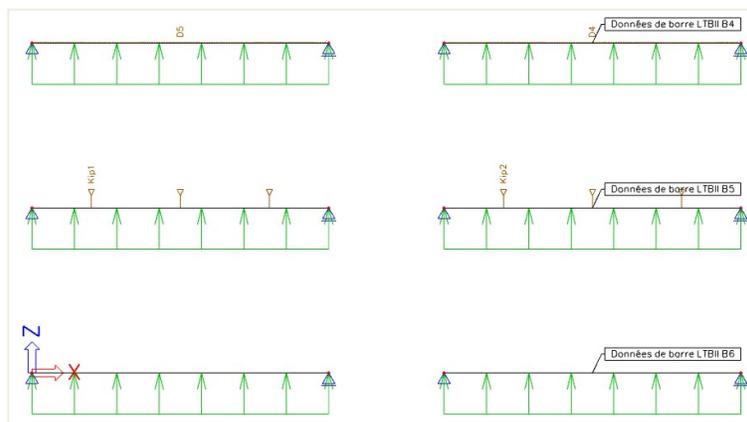
- Les conditions d'extrémités appropriées pour la torsion et le gauchissement
- Les efforts de début et de fin
- Les charges
- Les maintiens intermédiaires (diaphragmes, maintiens au déversement).

Pour utiliser cette option dans SCIA Engineer, la fonctionnalité « **Analyse 2nd ordre 7Ddl pour le déversement** » doit être activée. Dans les versions précédentes (avant SCIA Engineer 18.0), le nom de paramètre était « Déversement au 2nd ordre ».

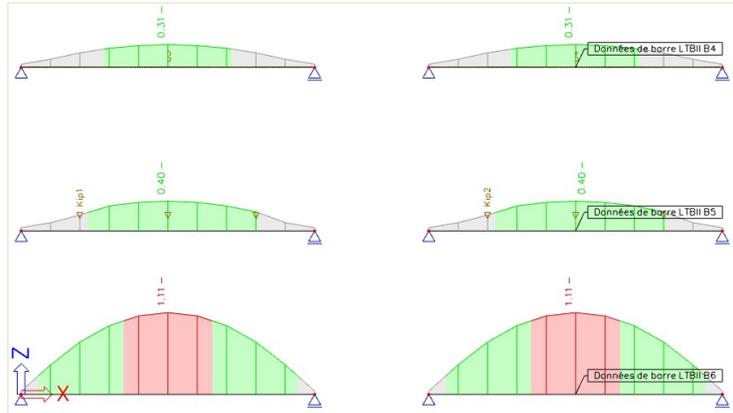
Ensuite, dans le processus « Acier », avec « « Données d'élément en acier LTBII », vous pouvez demander cette analyse sur une poutre.

Exemple : LTBII.esa

Dans cet exemple, la même poutre sera calculée avec les données d'éléments en acier LTBII et sans, dans trois configurations :

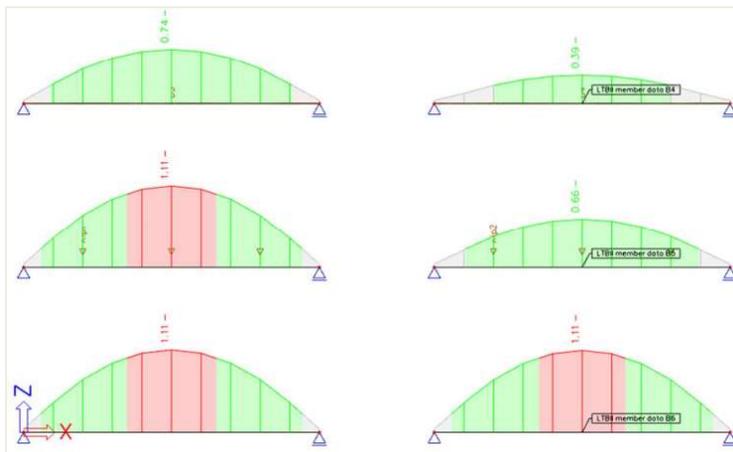


Lorsqu'on regarde le contrôle sous le cas de charges LC1, il n'y a pas beaucoup de différence entre les poutres avec et sans les données d'éléments en acier LTBII :



Dans Frilo, la rigidité de la tôle contre la rotation et la translation est prise en compte, il en découle une plus grande rigidité de la tôle et ainsi une meilleure unité de contrôle.

Lorsqu'on regarde le contrôle sous le cas de charges LC2, la direction de la charge a changé. La face supérieure des poutres est sous traction pour ce cas de charge. SCIA Engineer ne tient alors pas compte des appuis déversement ou des tôles sur les faces tendues. Mais Frilo peut prendre en compte cela. Il y a alors une augmentation de la rigidité :



Aussi, ce calcul est indiqué dans la sortie détaillée :

Contrôle de déversement

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 & 6.3.2.2 et formule (6.54)

Paramètres de déversement			
Méthode pour la courbe de déversement		Cas général	
Module de section plastique	$W_{pl,y}$	1.6600e-04	m ³
Moment critique élastique	M_{cr}	74.26	kNm
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	0.78	
Elancement limite	$\lambda_{rel,LT,0}$	0.20	
Courbe de déversement		a	
Imperfection	α_{LT}	0.21	
Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.80	
Résistance de calcul au flambement	$M_{b,Rd}$	36.73	kNm
Contrôle unité		0.39	-

Note: Le moment critique élastique M_{cr} a été calculé par le solveur FriLo BTII.

Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	l_{LT}	7.200	m

5.5. Contrôle en flexion et compression

Le contrôle en flexion et compression pour un élément sera effectué conformément à l'EN 1993-1-1 art. 6.3.3.

A moins qu'une analyse au second ordre soit effectuée, les éléments qui sont soumis à la fois à une compression axiale et à une flexion, doivent satisfaire les formules (6.61) et (6.62) :

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) + \left(k_{yy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) + \left(k_{yz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq 1$$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} \right) + \left(k_{zy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) + \left(k_{zz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq 1$$

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ et $M_{z,Ed}$ sont les valeurs de calcul de l'effort de compression et des moments maximum autour respectivement des axes y-y et z-z le long de l'élément.

χ_y et χ_z sont les coefficients de réduction dus au flambement flexionnel.

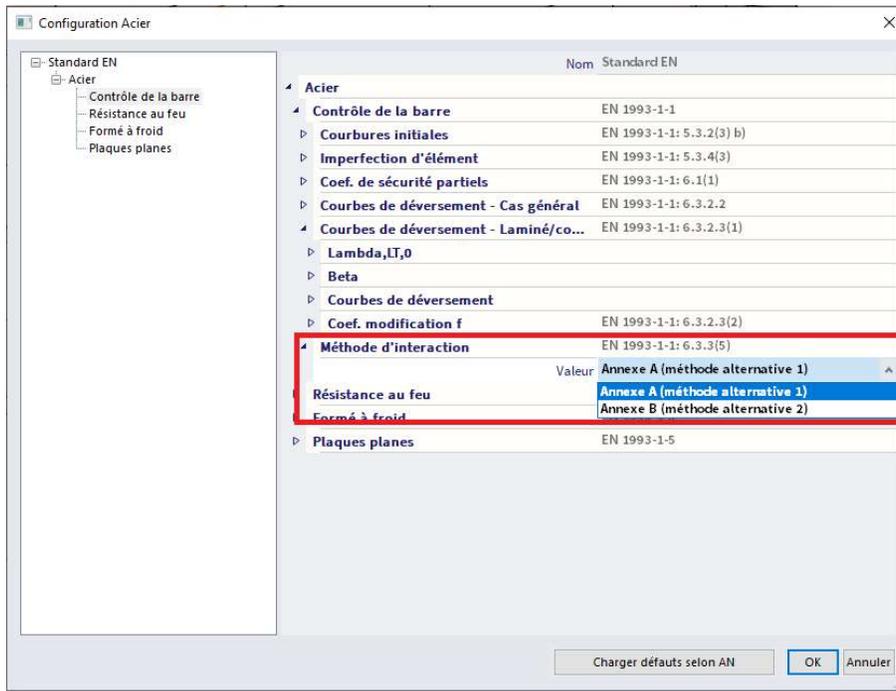
χ_{LT} est le coefficient de réduction du au déversement.

Tableau 6.7 — Valeurs pour $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ et $\Delta M_{i,Ed}$

Classe	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

Le choix entre les coefficients k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} et k_{zz} ont été dérivés de l'EN 1993-1-1, annexe A (méthode alternative 1) ou annexe B (méthode alternative 2).

Le choix entre les méthodes d'interaction 1 ou 2 peut être fait dans SCIA Engineer dans les paramètres de l'annexe nationale :



Exemple : Industrial Hall.esa

Regardons l'élément poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

Dans SCIA Engineer, toutes les formules de calcul, conformément à l'EN 1993 annexe 1 dans cet exemple, sont données :

Contrôle en flexion composée avec compression

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.3 et formule (6.61),(6.62)

Paramètres de contrôle en flexion composée avec compression			
Méthode d'interaction		méthode alternative 1	
Aire efficace de la section	A_{eff}	1.7222e+04	mm ²
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.4111e+06	mm ³
Module de section efficace	$W_{eff,z}$	3.9920e+05	mm ³
Force de compression de calcul	N_{Ed}	160.67	kN
Moment de flexion de calcul (maximum)	$M_{y,Ed}$	-701.31	kNm
Moment de flexion de calcul (maximum)	$M_{z,Ed}$	-0.34	kNm
Moment additionnel	$\Delta M_{y,Ed}$	0.00	kNm
Moment additionnel	$\Delta M_{z,Ed}$	0.00	kNm
Effort normal résistant caractéristique	N_{Rk}	4047.10	kN
Moment résistant caractéristique	$M_{y,Rk}$	1036.61	kNm
Moment résistant caractéristique	$M_{z,Rk}$	93.81	kNm
Coefficient de réduction	χ_y	0.78	
Coefficient de réduction	χ_z	0.42	
Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.75	
Coefficient d'interaction	k_{yy}	0.98	
Coefficient d'interaction	k_{yz}	0.83	
Coefficient d'interaction	k_{zy}	0.95	
Coefficient d'interaction	k_{zz}	0.81	

Le moment maximum $M_{y,Ed}$ est dérivé de la poutre B28 à la position 6.900 m.

Le moment maximum $M_{z,Ed}$ est dérivé de la poutre B28 à la position 6.900 m.

Paramètres pour méthode d'interaction 1			
Charge critique d'Euler	$N_{cr,y}$	5860.39	kN
Charge critique d'Euler	$N_{cr,z}$	2342.58	kN
Charge critique élastique	$N_{cr,T}$	4828.32	kN
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.4111e+06	mm ³
Moment d'inertie de la section	I_y	1.6612e+09	mm ⁴
Moment d'inertie de la section	I_z	5.2895e+07	mm ⁴
Constante de torsion	I_t	1.6153e+06	mm ⁴
Méthode pour le coefficient de moment équivalent $C_{my,0}$		Tableau A.2 ligne 1 (linéaire)	
Ratio des moments d'extrémité	ψ_y	0.00	
Coef. de moment équivalent	$C_{my,0}$	0.79	
Méthode pour le coefficient de moment équivalent $C_{mz,0}$		Tableau A.2 ligne 1 (linéaire)	
Ratio des moments d'extrémité	ψ_z	0.00	
Coef. de moment équivalent	$C_{mz,0}$	0.78	
Coefficient	μ_y	0.99	
Coefficient	μ_z	0.96	
Coefficient	E_y	17.04	
Coefficient	α_{LT}	1.00	
Moment critique en flexion uniforme	$M_{cr,0}$	1008.08	kNm
Elancement relatif	$\lambda_{rel,0}$	1.01	
Elancement relatif limite	$\lambda_{rel,0,lim}$	0.26	
Coef. de moment équivalent	C_{my}	0.96	
Coef. de moment équivalent	C_{mz}	0.78	
Coef. de moment équivalent	C_{mLT}	1.00	

Puis le contrôle est donné en deux fois, sous la forme d'une somme de trois valeurs, conformément aux formules (6.61) et (6.62) de l'EN 1993-1-1 :

Contrôle unité (6.61) = 0.05 + 0.89 + 0.00 = 0.94 -
Contrôle unité (6.62) = 0.09 + 0.86 + 0.00 = 0.95 -

Si on active l'affichage des formules dans la sortie détaillée, le calcul de chaque paramètre sera présenté.

5.6. Contrôle du voilement – EN 1993-1-5

5.6.1. Généralité

Le contrôle du voilement vérifiera si l'âme de la section peut être sujette au flambement local.

Ce contrôle ne se trouve pas dans l'EN 1993-1-1, mais dans l'EN 1993-1-5 : Calcul des structures en acier – Partie 1-5 : Plaques planes chargées dans leur plan.

Tout d'abord, il sera vérifié si la valeur de l'élanement est inférieure à une certaine valeur, car pour les âmes à faible élanement, cette vérification ne sera pas faite.

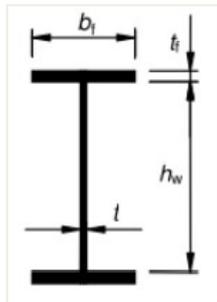
Les plaques avec h_w/t supérieur à $72 \cdot \varepsilon / \eta$ pour une âme non raidie devront être vérifiées pour la résistance au voilement.

Avec :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y * [N/mm^2]}}$$

η sera défini dans l'annexe nationale.

La valeur $\eta = 1,20$ est recommandé pour les aciers de nuances inférieures ou égales à S460.
Pour des nuances d'acier supérieures, $\eta = 1,00$ est recommandé.



Si l'élanement est plus grand que la valeur minimale, le contrôle au voilement est effectué conformément à l'EN1993-1-5, formule (5.10) (c'est une vérification de l'effort de cisaillement) et la formule (7.1) (qui est la vérification de l'interaction entre l'effort de cisaillement, le moment de flexion et l'effort normal). Les formules suivantes sont vérifiées dans SCIA Engineer.

Exemple : Shear buckling.esa

Regardons l'élément poutre B1. C'est un IPE160 :

$$h_w = 160 - (2 * 7,40) = 145,2 \text{ mm}$$

$$t = 5 \text{ mm}$$

$$h_w / t = 29,04$$

Ce doit être vérifié avec la valeur :

$$72 \cdot \varepsilon / \eta = 72 * (1,00 / 1,20) = 60$$

$$h_w / t < 72 \cdot \varepsilon / \eta$$

Le contrôle au voilement n'a pas besoin d'être effectué.

C'est aussi indiqué dans SCIA Engineer :

Contrôle du voilement

Selon EN 1993-1-5 article 5 & 7.1 et formule (5.10) & (7.1)

Paramètres de voilement			
Longueur du panneau d'âme	a	6.000	m
âme		non raidie	
Hauteur d'âme	h_w	145	mm
Épaisseur d'âme	t	5	mm
Coefficient de matériau	ϵ	1.00	
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	

Vérification du voilement			
Élancement âme	h_w/t	29.04	
Élancement limite de l'âme		60.00	

Note: L'élancement de l'âme est telle que les effets du voilement peuvent être ignorés conformément à l'EN 1993-1-5 article 5.1(2).

Regardons l'élément poutre B2. C'est un profilé :

$$h_w = 600 - (2 \cdot 9) = 582 \text{ mm}$$

$$t = 6 \text{ mm}$$

$$h_w / t = 97$$

Ce doit être vérifié avec la valeur :

$$72 \cdot \epsilon / \eta = 72 \cdot (1,00 / 1,20) = 60$$

$$h_w / t < 72 \cdot \epsilon / \eta$$

Le contrôle au voilement doit être effectué.

Contrôle du voilement

Selon EN 1993-1-5 article 5 & 7.1 et formule (5.10) & (7.1)

Paramètres de voilement			
Longueur du panneau d'âme	a	6.000	m
âme		non raidie	
Montant d'extrémité		non rigide	
Hauteur d'âme	h_w	582	mm
Épaisseur d'âme	t	6	mm
Limite élastique	f_{yw}	235.0	MPa
Largeur de semelle	b_f	276	mm
Épaisseur de semelle	t_f	9	mm
Limite élastique	f_{yf}	235.0	MPa
Coefficient de matériau	ϵ	1.00	
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	

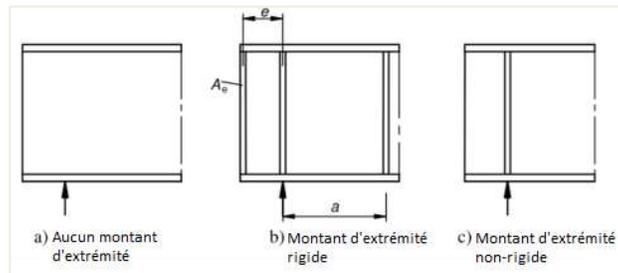
Vérification du voilement			
Élancement âme	h_w/t	97.00	
Élancement limite de l'âme		60.00	
Élancement de plaque	λ_w	1.12	
Coefficient de réduction	χ_w	0.74	
Contribution de l'âme	$V_{bw,Rd}$	350.27	kN
Capacité de la semelle	$M_{f,Rd}$	344.99	kNm
Coefficient de semelle	c	1.606	m
Contribution de la semelle	$V_{bf,Rd}$	3.27	kN
Résistance maximale	$V_{b,Rd,limit}$	568.54	kN
Résistance	$V_{b,Rd}$	353.54	kN
Résistance plastique	$M_{pl,Rd}$	502.92	kNm
Ratio d'effort tranchant	$\eta_{3,bar}$	0.04	

Contrôle unité (5.10) = 0.04 -

Note: La vérification de l'interaction entre la flexion et le voilement peut être négligée car le ratio de cisaillement ne dépasse pas 0.5.

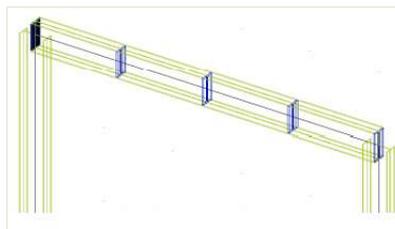
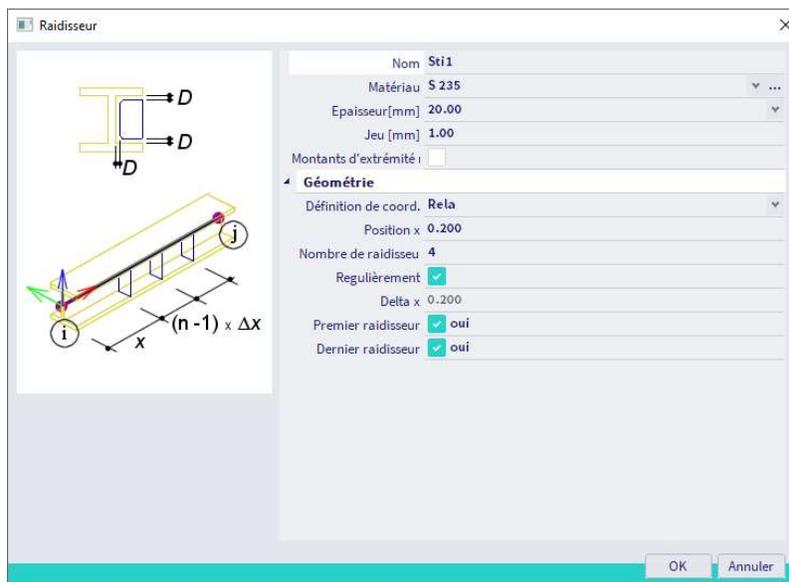
5.6.2. Raidisseurs

Dans l'EN 1993-1-5, figure 5.1, les définitions des raidisseurs sont données :



Ces raidisseurs influenceront la longueur totale pour le voilement. Dans SCIA Engineer, ces raidisseurs peuvent être saisis sur une poutre et auront une influence **UNIQUEMENT** sur le contrôle du voilement dans le processus « Acier ».

Ces raidisseurs peuvent être saisis via le processus « Acier » et « Raidisseur » :



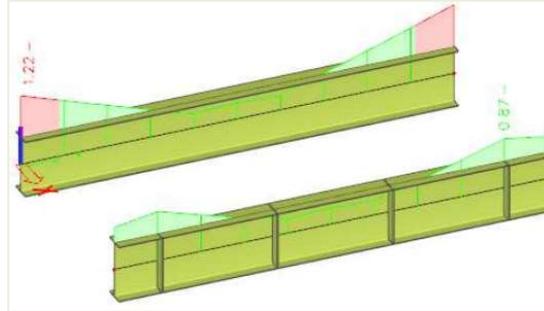
Les raidisseurs définissent les dimensions qui sont seulement significatives pour le contrôle du voilement. Lorsqu'il n'y a pas de raidisseurs définis, la valeur de la longueur de voilement « a » est égale à la longueur de l'élément.

Si vous souhaitez prendre en compte des raidisseurs dans le modèle analytique, vous devez les modéliser indépendamment du processus « Acier ». Vous pouvez créer une nouvelle section, dans laquelle les raidisseurs seraient considérés, et appliquer cette section à l'élément 1D, à chaque fois sur une longueur égale à l'épaisseur du raidisseur. Après calcul du modèle, le raidisseur sera pris en compte dans les résultats de déformations, contraintes, ...

Exemple : Stiffeners.esa

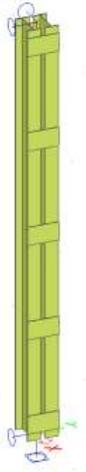
Dans cet exemple, deux poutres identiques ont été saisies : B1 sans raidisseurs et B2 avec raidisseurs.

Comparons les contrôles du voilement avec et sans raidisseurs :



B1 – sans raidisseurs				B2 – avec raidisseurs			
Contrôle du voilement Selon EN 1993-1-5 article 5 & 7.1 et formule (5.10) & (7.1)				Contrôle du voilement Selon EN 1993-1-5 article 5 & 7.1 et formule (5.10) & (7.1)			
Paramètres de voilement				Paramètres de voilement			
Longueur du panneau d'âme	a	6.000	m	Longueur du panneau d'âme	a	1.600	m
âme		non raidie		âme		raidie	
Montant d'extrémité		non rigide		Montant d'extrémité		non rigide	
Hauteur d'âme	h_w	782.00	mm	Hauteur d'âme	h_w	782.00	mm
Épaisseur d'âme	t	5.00	mm	Épaisseur d'âme	t	5.00	mm
Limite élastique	f_{yw}	235.0	MPa	Limite élastique	f_{yw}	235.0	MPa
Largeur de semelle	b_f	275.00	mm	Largeur de semelle	b_f	275.00	mm
Épaisseur de semelle	t_f	9.00	mm	Épaisseur de semelle	t_f	9.00	mm
Limite élastique	f_{yf}	235.0	MPa	Limite élastique	f_{yf}	235.0	MPa
Coefficient de matériau	ϵ	1.00		Coefficient de matériau	ϵ	1.00	
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20		Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Vérification du voilement				Vérification du voilement			
Elancement âme	h_w/t	156.40		Coefficient de voilement	k_τ	6.30	
Elancement limite de l'âme		60.00		Elancement âme	h_w/t	156.40	
Elancement de plaque	λ_w	1.81		Elancement limite de l'âme		64.82	
Coefficient de réduction	χ_w	0.46		Elancement de plaque	λ_w	1.67	
Contribution de l'âme	$V_{bw,Rd}$	243.24	kN	Coefficient de réduction	χ_w	0.50	
Capacité de la semelle	$M_{f,Rd}$	460.07	kNm	Contribution de l'âme	$V_{bw,Rd}$	264.19	kN
Coefficient de semelle	c	1.570	m	Capacité de la semelle	$M_{f,Rd}$	460.07	kNm
Contribution de la semelle	$V_{bf,Rd}$	1.92	kN	Coefficient de semelle	c	0.419	m
Résistance maximale	$V_{b,Rd,limit}$	636.60	kN	Contribution de la semelle	$V_{bf,Rd}$	11.38	kN
Résistance	$V_{b,Rd}$	245.16	kN	Résistance maximale	$V_{b,Rd,limit}$	636.60	kN
Résistance plastique	$M_{pl,Rd}$	693.01	kNm	Résistance	$V_{b,Rd}$	275.57	kN
Ratio d'effort tranchant	$\eta_{\bar{z},bar}$	1.23		Résistance plastique	$M_{pl,Rd}$	693.01	kNm
Moment résistant	$M_{R,eff}$	578.16	kNm	Ratio d'effort tranchant	$\eta_{\bar{z},bar}$	0.91	
Ratio de moment de flexion	$\eta_{\bar{1},bar}$	0.43		Moment résistant	$M_{R,eff}$	578.16	kNm
Ratio limite de moment	$\eta_{\bar{1},bar,limit}$	0.66		Ratio de moment de flexion	$\eta_{\bar{1},bar}$	0.20	
				Ratio limite de moment	$\eta_{\bar{1},bar,limit}$	0.66	
Contrôle unité (5.10) = 1.22 -				Contrôle unité (5.10) = 0.87 -			

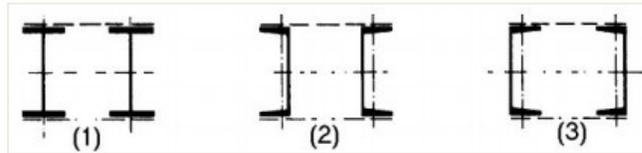
Chapitre 6: Vérification ELU des barres composées uniformes en compression à barrettes de liaison



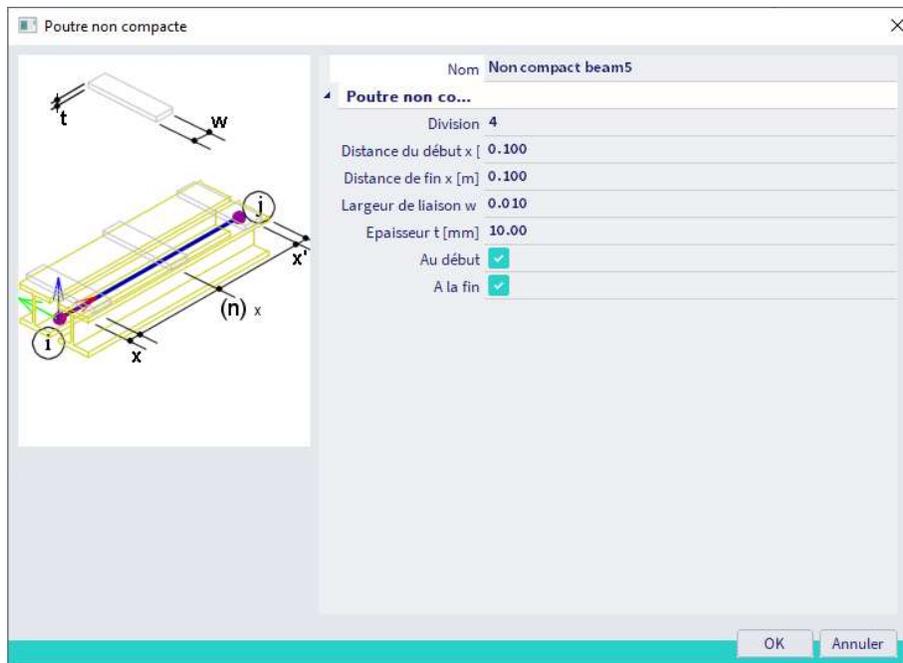
Ce contrôle sera effectué conformément à l'EC-EN 1993-1-1 art.6.4.1 et 6.4.3.

Les sections paires suivantes sont supportées comme des éléments composés uniformes en compression à barrettes de liaison:

- (1) 2I
- (2) 2Uo
- (3) 2Uc

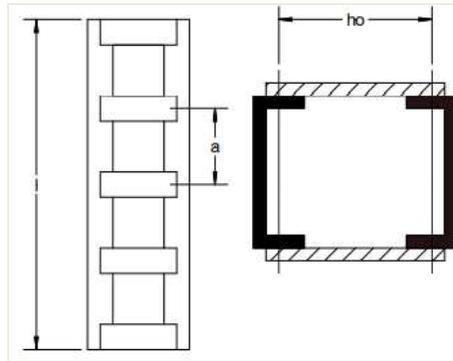


Vous pouvez ajouter les liens (barrettes de liaison) par le processus « Acier » / « Etrésillons » :



Les vérifications additionnels suivants sont effectués lors du contrôle ELU :

- Contrôle de la résistance au flambement autour de l'axe faible d'une membrure seule avec $N_{f,Sd}$;
- Contrôle de la section d'une membrure seule, en utilisant les efforts internes ;
- Contrôle de la section d'une barrette de liaison seule, en utilisant les efforts internes.



Exemple : EC_EN_Battened_Compression_Members_I.esa

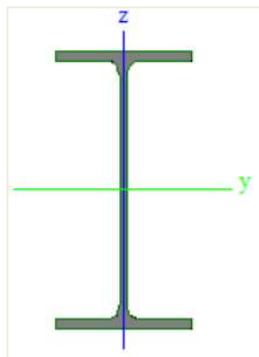
Regardons l'élément poteau B1.

Sur cet élément, seul un effort de compression de 500kN est appliqué.

Propriétés de la barrette de liaison :

Division	4
Distance du début x [m]	0.200
Distance de fin x [m]	0.200
Largeur de liaison w [m]	0.220
Epaisseur t [mm]	7.00
Au début	<input checked="" type="checkbox"/>
A la fin	<input checked="" type="checkbox"/>

Propriétés de la section IPE330 :



A [mm ²]	6.2600e+03
Ay [mm ²]	3.7139e+03
Az [mm ²]	2.5380e+03
AL [m ² /m]	1.2540e+00
AD [m ² /m]	1.2540e+00
cYSCU [mm]	80.00
cZSCU [mm]	165.00
α [deg]	0.00
Iy [mm ⁴]	1.1770e+08
Iz [mm ⁴]	7.8800e+06
Iy [mm]	137.12
Iz [mm]	35.48
Wely [mm ³]	7.1300e+05
Welz [mm ³]	9.8500e+04
Wply [mm ³]	8.0400e+05
Wplz [mm ³]	1.5400e+05
Mply+ [Nmm]	221399447.81
Mply- [Nmm]	221399447.81
Mplz+ [Nmm]	42276174.41
Mplz- [Nmm]	42276174.41
dy [mm]	0.00
dz [mm]	0.00
It [mm ⁴]	2.8200e+05
Iw [mm ⁶]	1.9900e+11
βy [mm]	0.00
βz [mm]	0.00

Valeurs dans SCIA Engineer :

Contrôle d'élément comprimé étrésoillé			
Longueur	L	4600.00	mm
Longueur	a	1150.00	mm
Distance entre les centres de gravité des membrures	h ₀	210.00	mm
Moment d'inertie de l'aire de la membrure	I _{ch}	7.8800e+06	mm ⁴
Elancement	λ	41.50	
Coefficient d'efficacité	μ	1.00	
Aire de la membrure	A _{ch}	6.2600e+03	mm ²
Moment d'inertie effectif de la section	I _{eff}	1.5379e+08	mm ⁴
Rigidité à l'effort tranchant	S _v	24381.93	kN
Courbure initiale	e ₀	9.20	mm
Moment	M _{Ed}	0.00	kNm
Moment	M _{Ed}	4.86	kNm
Effort tranchant	V _{Ed}	3.32	kN

Calcul manuel de ces valeurs :

- l : longueur = longueur de l'élément – (distance du début) – (distance de fin)
 $l = 5000\text{mm} - 200\text{mm} - 200\text{mm} = 4600\text{mm}$

- a : distance entre barrettes de liaison = l – (nombre de divisions)
 $a = 4600\text{mm} / 4 = 1150\text{mm}$

- h₀ : distance entre le centre de gravité des membrures = 210mm

- I_{chord} : I_z du profilé IPE330

- A_{chord} : section du profilé en I, soit « A » de l'IPE330

- λ :

$$\lambda = L/i_0 = 4600\text{mm}/110,833\text{mm} = 41,5$$

$$I_1 = (0,5 * h_0^2 * A_{ch}) + (2 * I_{ch})$$

$$I_1 = [0,5 * (210\text{mm})^2 * 6260\text{mm}^2] + (2 * 7881000\text{mm}^4)$$

$$I_1 = 1,538 * 10^8\text{mm}^4$$

$$i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2 * A_{ch}}} = \sqrt{\frac{1,538 * 10^8\text{mm}^4}{2 * 6260\text{mm}^2}} = 110,833\text{mm}$$

- μ :

$$\mu = 0 \text{ si } \lambda \geq 150$$

$$\mu = 2 - \frac{\lambda}{75} \text{ si } 75 < \lambda < 150$$

$$\mu = 1 \text{ si } \lambda \leq 75$$

Dans cet exemple : $\lambda = 41,5 < 75$, donc $\mu = 1,00$

- I_{eff} :

$$I_{eff} = (0,5 * h_0^2 * A_{ch}) + (2 * \mu * I_{ch})$$

$$I_{eff} = [0,5 * (210\text{mm})^2 * 6260\text{mm}^2] + (2 * 1,00 * 7881000\text{mm}^4)$$

$$I_{eff} = 1,538 * 10^8\text{mm}^4$$

- S_v :

$$S_v = \frac{24 * E * I_{ch}}{a^2 * \left(1 + \frac{2 * I_{ch} * h_0}{n * I_b * a}\right)} \text{ avec } S_v \leq \frac{2 * \pi^2 * E * I_{ch}}{a^2}$$

n : nombre de barrettes de liaison : n = 2

$$I_b = (\text{épaisseur de la barrette}) * (\text{largeur de la barrette})^3 / 12$$

$$I_b = (7\text{mm}) * (220\text{mm})^3 / 12$$

$$I_b = 6,211 * 10^6 \text{mm}^4$$

$$S_v = \frac{24 * E * I_{ch}}{a^2 * \left(1 + \frac{2 * I_{ch}}{n * I_b} * \frac{h_0}{a}\right)} = \frac{24 * (210000\text{N/mm}^2) * (7881000\text{mm}^4)}{(1150\text{mm})^2 * \left(1 + \frac{2 * 7881000\text{mm}^4}{2 * 6,211 * 10^6\text{mm}^4} * \frac{210\text{mm}}{1150\text{mm}}\right)} = 2,438 * 10^4 \text{kN}$$

$$S_{v,\max} = \frac{2 * \pi^2 * E * I_{ch}}{a^2} = \frac{2 * \pi^2 * 210000\text{N/mm}^2 * 7881000\text{mm}^4}{(1150\text{mm})^2} = 2,470 * 10^4 \text{kN}$$

$$S_v < S_{v,\max} \text{ donc } S_v = 2,438 * 10^4 \text{kN}$$

- e_0 :

$$e_0 = \frac{l}{500} = \frac{4600\text{mm}}{500} = 9,2\text{mm}$$

- $M_{Ed,I}$: M_z de la section non pris en compte = 0kN.m

- M_{Ed} :

$$\text{si } \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}\right) > 0, \text{ alors } M_{Ed} = \frac{(N_{Ed} * e_0) + M_{Ed,I}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$$

$$\text{sinon } M_{Ed} = 1 * 10^6 \text{kN.m}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_{eff}}{L^2} = \frac{\pi^2 * (210000\text{N/mm}^2) * (1,538 * 10^8 * \text{mm}^4)}{(4600\text{mm})^2} = 15064\text{kN}$$

On a donc :

$$\left(1 - \frac{500\text{kN}}{15064\text{kN}} - \frac{500\text{kN}}{24700\text{kN}}\right) = 0,9466 > 0$$

$$M_{Ed} = \frac{(500\text{kN} * 9,2\text{mm}) + 0\text{kN.m}}{0,9466} = 4860\text{kN.mm} = 4,860\text{kN.m}$$

- V_{Ed} :

$$V_{Ed} = \frac{\pi * M_{Ed}}{l} = \frac{\pi * 4860\text{kN.mm}}{4600\text{mm}} = 3,32\text{kN}$$

Le contrôle de la membrure sera effectué avec un contrôle de section conformément à l'EN 1993-1-1 pour le profil de membrure avec les efforts internes suivantes sur une barrette de liaison :

Contrôle de membrure comme poutre entre les étrésoillons

Selon EN 1993-1-1 article 6.4.3.1 & 6.2.9.1 et formule (6.42)

Effort normal	N_G	270.78	kN
Effort tranchant	V_G	1.66	kN
Moment	M_G	0.95	kNm
Contrôle unité		0.19	-

Calcul manuel de ces valeurs :

- N_G :

$$N_G = N_{chord} = (0,5 * N_{Ed}) + \frac{M_{Ed} * h_0 * A_{ch}}{2 * I_{eff}}$$

$$N_G = N_{chord} = (0,5 * 500\text{kN}) + \frac{4860\text{kN.mm} * 210\text{mm} * 6260\text{mm}^2}{2 * 1,538 * 10^8 * \text{mm}^4} = 270,78\text{kN}$$

- V_G :

$$V_G = \frac{V_{Ed}}{2} = \frac{3,32\text{kN}}{2} = 1,66\text{kN}$$

- M_G :

$$M_G = \frac{V_{Ed} * a}{4} = \frac{3,32\text{kN} * 1150\text{mm}}{4} = 0,95\text{kN.m}$$

Le contrôle de section donnera une unité de contrôle de 0,19.

Contrôle de flambement de membrure

Selon EN 1993-1-1 article 6.4.3.1 & 6.3.1.1 et formule (6.46)

Force de membrure	$N_{ch,Ed}$	270.78	kN
Longueur de flambement	l_{cr}	1150.00	mm
Élancement	λ	32.41	
Élancement relatif	λ_{rel}	0.37	
Courbe de flambement		b	
Imperfection	α	0.34	
Coefficient de réduction	χ	1.00	
Contrôle unité		0.16	-

Calcul manuel de ces valeurs :

- $N_{ch,Ed}$: cf le « contrôle de membrure comme poutre entre les étrésoillons »
 $N_{chord} = 270,78\text{kN}$

- l_{cr} : longueur de flambement

- λ : élancement :

$$\lambda = \frac{l_{cr}}{\sqrt{\frac{I_{cg}}{A_{cg}}}} = \frac{1150\text{mm}}{\sqrt{\frac{7881000\text{mm}^4}{6260\text{mm}^2}}} = 32,411$$

- λ_{rel} : élancement relatif :

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{ch} * f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{6260\text{mm}^2 * 275 \text{ N/mm}^2}{12351000\text{N}}} = 0,373$$

$$\text{avec } N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_{ch}}{l_{cr}^2} = \frac{\pi^2 * (210000 \text{ N/mm}^2) * (7881000\text{mm}^4)}{(1150\text{mm})^2} = 12351\text{kN}$$

- Courbe de flambement = b, c'est la courbe de flambement pour l'IPE330 autour de l'axe z.

- α : coefficient d'imperfection pour la courbe de flambement « b » = 0,34

- χ : coefficient de réduction, qui peut être calculé comme expliqué dans le contrôle au flambement.

- UC : unité de contrôle

$$UC = \frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{270,78\text{kN}}{1618,2\text{kN}} = 0,16$$

$$\text{avec } N_{b,Rd} = \chi * \frac{A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,94 * \frac{6260\text{mm}^2 * 275 \text{ N/mm}^2}{1,00} = 1618,21\text{kN}$$

Contrôle d'étrésillon

Selon EN 1993-1-1 article 6.4.3.1, 6.2.9.2 & 6.2.6 et formule (6.42), (6.19)

Epaisseur	t	7.00	mm
Largeur de lien	b	220.00	mm
Moment	T	9.09	kN
Moment	M _G	0.95	kNm
Contrainte	σ	16.9	MPa
Contrôle unité		0.06	-
Contrainte	τ	5.9	MPa
Contrôle unité		0.04	-

Calcul manuel de ces valeurs :

- t : épaisseur de la barrette de liaison

- b : largeur de la barrette de liaison

- T :

$$T = \frac{V_{Ed} * a}{h_0 * 2} = \frac{3,32\text{kN} * 1150\text{mm}}{210\text{mm}^2} = 9,09\text{kN}$$

 - M_G:

$$M_G = 0,954\text{kN.m}$$

(cf contrôle précédent)

- σ :

$$\sigma = \frac{M_G * b/2}{I_b} = \frac{954000\text{N} \cdot \text{mm} * 220\text{mm}/2}{6,211 * 10^6 * \text{mm}^4} = 16,9\text{MPa}$$

 avec I_b : cf ci-avant le calcul de S_v

 - UC_σ:

$$UC_\sigma = \frac{\sigma}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{16,9\text{MPa}}{\frac{275\text{ N/mm}^2}{1,00}} = 0,06$$

- τ :

$$\tau = \frac{T}{b * t} = \frac{9090\text{N}}{220\text{mm} * 7\text{mm}} = 5,9\text{MPa}$$

 - UC_τ:

$$UC_\tau = \frac{\tau}{\frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}}} = \frac{5,9\text{MPa}}{\frac{275\text{ N/mm}^2/\sqrt{3}}{1,00}} = 0,04$$

Note : « ch » pour « chord », c'est-à-dire « membrure » en français.

Chapitre 7: Optimisation

Dans SCIA Engineer, il existe deux façons d'effectuer une optimisation :

- Une optimisation de sections : optimisation d'une section choisie
- Une optimisation générale : optimisation de une ou plusieurs (ou toutes) sections en même temps.

Ces deux options sont explicitées dans les deux paragraphes ci-dessous.

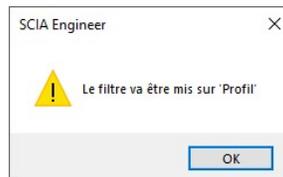
7.1. Optimisation des sections

Avec cette option, vous pouvez optimiser une section pour le contrôle acier. Ceci est expliqué dans l'exemple ci-après.

Exemple : Optimisation.esa

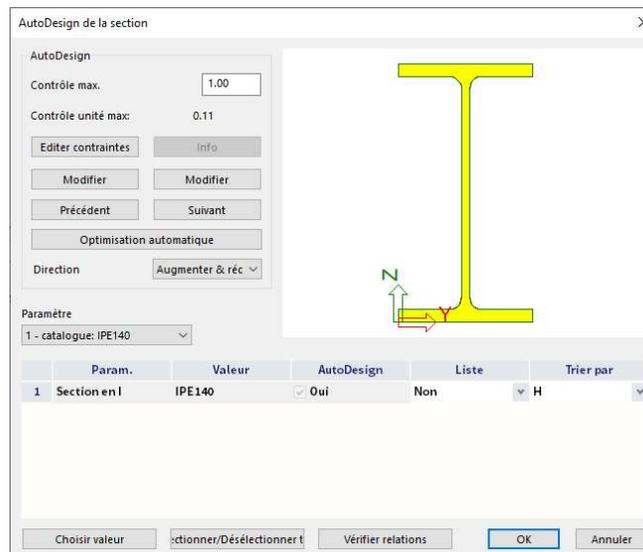
L'optimisation se trouve dans le processus « Acier », puis « Contrôle ELU de l'acier ». Tout d'abord, le contrôle d'acier doit être fait, cliquez donc sur « Régénérer ».

Puis cliquez ensuite sur « Autodesign », SCIA Engineer affichera alors le message suivant :



Dans la fenêtre de propriétés du contrôle, l'option en face de « Filtre » a été modifiée en « Section ». Choisissez maintenant ici la section IPE140 et cliquez à nouveau sur « Régénérer » puis sur « Autodesign ».

Maintenant la fenêtre « Autodesign de la section » va s'ouvrir :



D'abord, vous pouvez remplir le « Contrôle max. ». Normalement c'est un contrôle unité de 1,00.

Le « Contrôle unité max. » affiché ci-dessous est le contrôle unité maximal pour l'IPE140, trouvé dans ce projet.

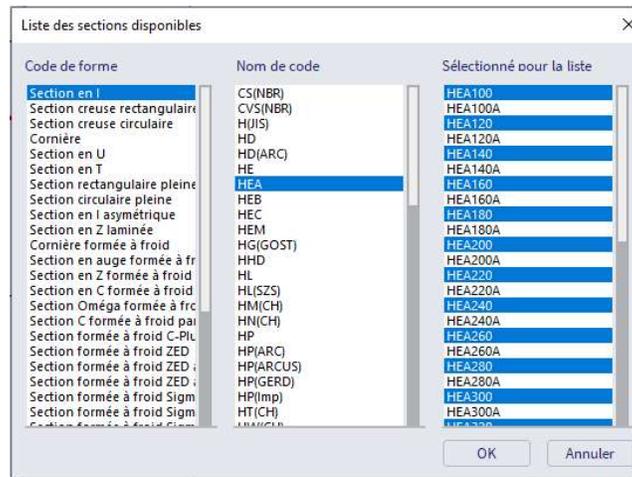
Lorsque vous cliquez sur « Optimisation automatique », SCIA Engineer proposera la plus petite section IPE qui résistera aux efforts internes calculés. Dans cet exemple, un IPE80AA sera trouvé. En cliquant sur « OK », SCIA Engineer remplace automatiquement ce profilé IPE 140 par un profilé IPE80AA.

Le contrôle acier de cet IPE80AA est alors effectué avec les efforts internes calculés avec les propriétés du profilé IPE140. Par exemple, le poids propre ne sera pas correctement pris en compte. Le projet doit donc être recalculé, avant d'accepter les résultats de ce contrôle.

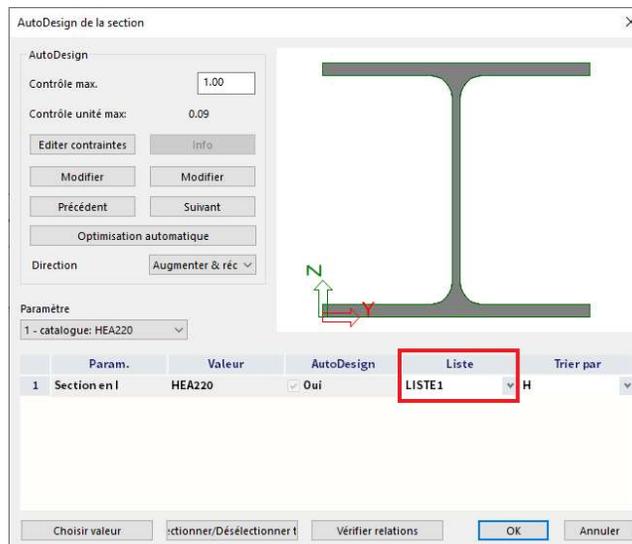
Il est également possible d'utiliser une **liste de sections**. Avec cette liste, il est possible de préciser quelles sections peuvent être utilisées ou non. Par exemple, la section IPE140A peut être retirée des possibilités de l'autodesign.

Recalculons le projet et faisons une liste pour les poteaux. Cela peut se faire par le menu principal « Bibliothèque » / « Structure et Analyse » / « Liste de sections droites ».

Dans cette fenêtre, sélectionnez les profilés que vous souhaitez ajouter à cette liste :



Effectuons un autodesign maintenant pour les poteaux HEA220, cette liste peut être choisie :



Pour le moment, ce profilé a un « Contrôle unité max. » de 0,09, alors SCIA Engineer recherchera le profilé le plus petit dans la « LISTE1 » qui se rapprochera du contrôle unité de 1,00.

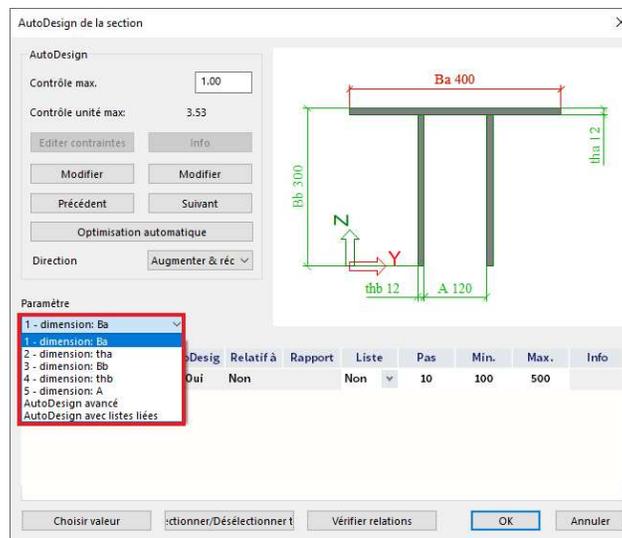
Fermer cet exemple avant de le sauvegarder ! Il sera utilisé à nouveau dans un autre paragraphe !

Dans le prochain exemple, les différentes options de l'optimisation de section seront expliquées.

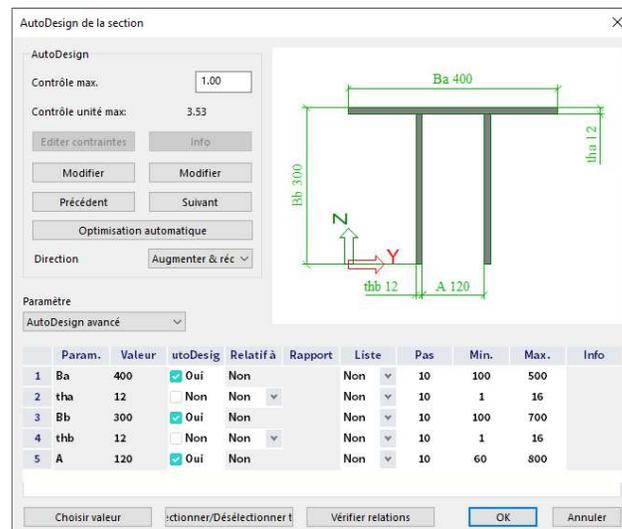
Exemple : Optimisation2.esa

Cliquez dans le processus « Acier » sur « Contrôle ELU de l'acier », puis allez dans le menu « Autodesign » pour cette poutre.

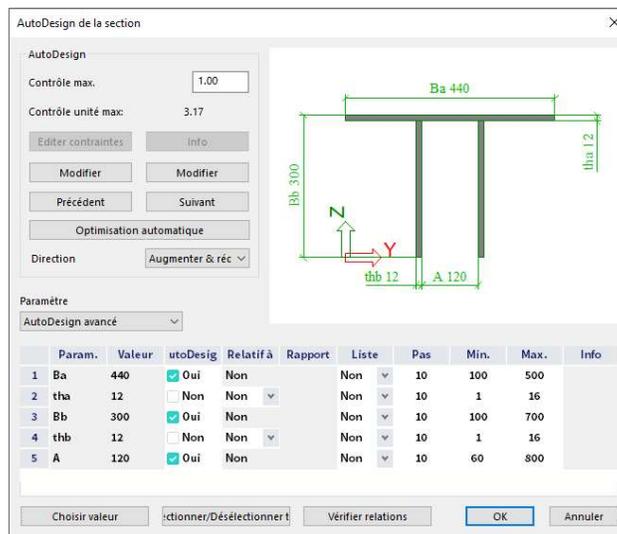
Ce profilé a beaucoup de paramètres, vous pouvez alors choisir quel paramètre doit être mis à jour :



Aussi, l'option « Autodesign avancé » apparaît. Cette option permet d'optimiser plusieurs paramètres en même temps tout en donnant des restrictions à chacun de ces paramètres. Saisissez les options suivantes :



Avec ces paramètres, les épaisseurs t_{ha} et t_{hb} ne seront pas optimisées. Si vous souhaitez les optimiser également, le « Pas » devra être choisi prudemment (par exemple un « Pas » de 1 au lieu de 10). Toutes les autres options peuvent être adaptées dans SCIA Engineer. Lorsque vous cliquez sur « Optimisation automatique », le profilé suivant sera proposé par SCIA Engineer :



Avec l'option « Choisir valeur », une valeur pour un paramètre en particulier peut être définie. Par exemple, sélectionnez le paramètre « Ba » et cliquez sur « Choisir valeur ». La valeur de 500mm peut être saisie. Et le « Contrôle unité max. » pour ce profilé sera adapté automatiquement.

7.2. Optimisation générale

Il est également possible d'effectuer une optimisation complète dans SCIA Engineer. Avec cette option, un ou plusieurs profilés peuvent être optimisés en même temps. Le calcul sera ensuite relancé et les efforts internes seront recalculés avec les nouvelles sections, cela sera suivi d'une nouvelle optimisation.

Le processus itératif peut :

- S'arrêter parce que tous les profilés n'ont pas besoin d'être optimisés et que le même profilé a déjà été trouvé à l'étape précédente ;
- Ou s'arrêter parce que le nombre maximum d'étapes a été atteint si celui-ci a été saisi par l'utilisateur.

Il est conseillé de saisir un nombre d'étapes itératives, sinon ce processus d'optimisation peut devenir une boucle et ne s'arrêtera qu'après 99 itérations. Cela risque de prendre un certain temps de calcul.

Le principe du processus d'optimisation générale est expliquée dans l'exemple suivant :

Exemple : Optimisation.esa

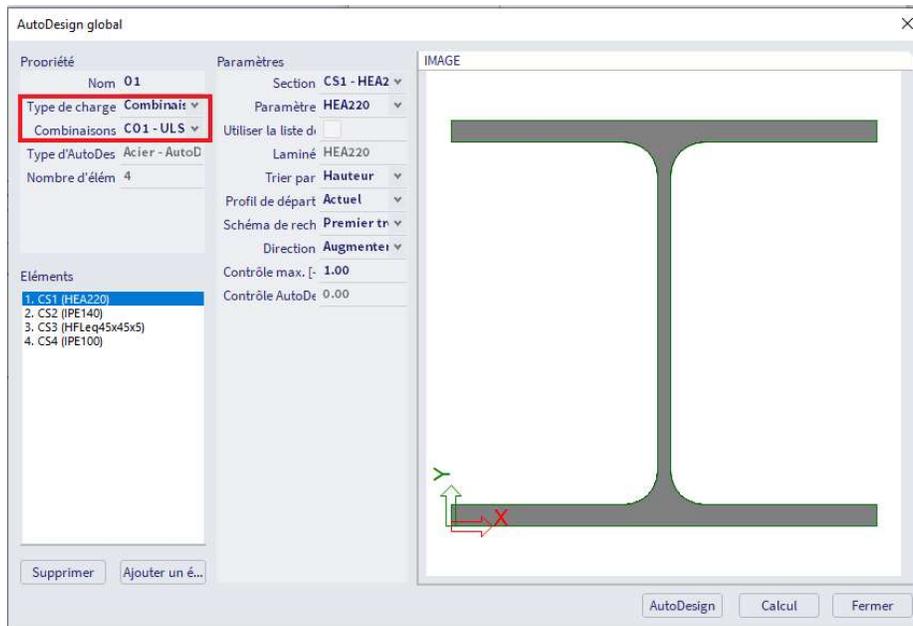
Si cet exemple est encore ouvert du précédent chapitre, s'il-vous-plait, fermez-le et réouvrez-le sans le sauvegarder.

Calculez le projet puis cliquez sur le menu principal « Outils » / « Calcul et maillage » / « Autodesign ».

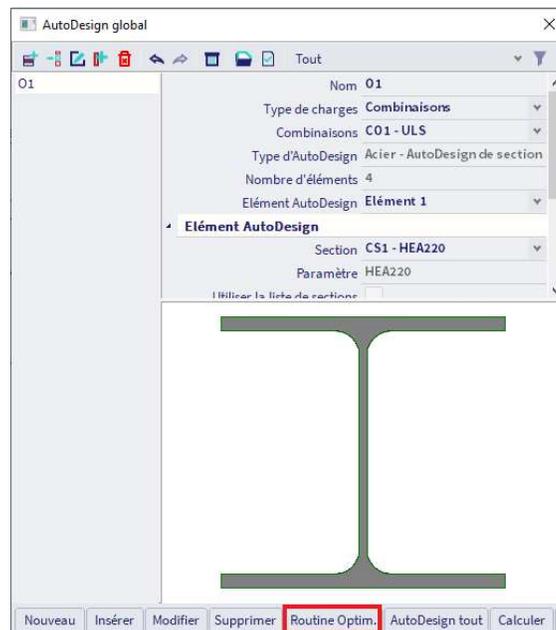
Cliquez sur « Ajouter un élément », puis sur « Autodesign » et ajoutez toutes les sections de ce projet.

La combinaison, pour laquelle le calcul d'optimisation doit être calculé, peut être choisie.

Aussi, pour chaque profilé, vous pouvez indiquer si ce profilé doit être optimisé seulement en augmentant la section (donc doit devenir plus grand) ou bien dans les deux directions « augmenter et réduire » (et donc peut devenir un profilé plus petit). Avec cette dernière option, il y a une chance que le processus itératif devienne une boucle.



Maintenant fermez cette fenêtre, puis dans la fenêtre suivante, cliquez sur « Routine Optim. » :



Vous pouvez alors choisir le nombre maximum d'itérations :

- « Déterminer automatiquement » : le processus d'itération s'arrêtera si tous les profilés sont optimisés et si aucun résultat différent n'est trouvé dans une étape particulière. Dans ce cas, aucun nombre d'itérations maximum est à saisir.
- « Limiter le nombre d'itérations » : maximum du nombre d'itérations.

Saisir 6 itérations comme nombre limite et cliquez sur « Départ ».

Le processus itératif se lance alors. Il s'arrêtera lorsqu'aucune différence ne sera trouvée ou après 6 itérations. Dans cet exemple, SCIA Engineer arrêtera le calcul après 5 itérations, car toutes les sections restent les mêmes après la cinquième itération.

Après ce processus, une fenêtre d'information s'affichera concernant cette itération. Les deux premières colonnes (« Section » et « Paramètre ») ne fournissent pas beaucoup d'information : elles mentionnent toutes les deux la section finale.

▪ Itération n°1 :

1. Pas routine: 1					
1.1. O1					
Section	Paramètre	Trier par	Section d'origine	AutoDesign de section	Contrôle AutoDesign [1]
CS1 - HEA160A	HEA160A	Hauteur	CS1 - HEA220	CS1 - HEA200	0.82
CS2 - IPE200O	IPE200O	Hauteur	CS2 - IPE140	CS2 - IPE200O	0.89
CS3 - HFLeq90x90x9	HFLeq90x90x9	Hauteur	CS3 - HFLeq45x45x5	CS3 - HFLeq80x80x8	0.94
CS4 - IPE140A	IPE140A	Hauteur	CS4 - IPE100	CS4 - IPE140AA	0.91

Profilés modifiés :

- CS1 : HEA220 => HEA200
- CS2 : IPE140 => IPE200O
- CS3 : HFLeq45x45x5 => HFLeq80x80x8
- CS4 : IPE100 => IPE140AA

▪ Itération n°2 :

2. Pas routine: 2					
Section	Paramètre	Trier par	Section d'origine	AutoDesign de section	Contrôle AutoDesign [1]
CS1 - HEA160A	HEA160A	Hauteur	CS1 - HEA200	CS1 - HEA160	0.92
CS2 - IPE200O	IPE200O	Hauteur	CS2 - IPE200O	CS2 - IPE200	0.99
CS3 - HFLeq90x90x9	HFLeq90x90x9	Hauteur	CS3 - HFLeq80x80x8	CS3 - HFLeq90x90x9	0.82
CS4 - IPE140A	IPE140A	Hauteur	CS4 - IPE140AA	CS4 - IPE140A	0.97

Profilés modifiés :

- CS1 : HEA200 => HEA160
- CS2 : IPE200O => IPE200
- CS3 : HFLeq80x80x8 => HFLeq90x90x9
- CS4 : IPE140AA => IPE140A

▪ Itération n°3 :

3. Pas routine: 3					
Section	Paramètre	Trier par	Section d'origine	AutoDesign de section	Contrôle AutoDesign [1]
CS1 - HEA160A	HEA160A	Hauteur	CS1 - HEA160	CS1 - HEA160	0.76
CS2 - IPE200O	IPE200O	Hauteur	CS2 - IPE200	CS2 - IPE200O	0.87
CS3 - HFLeq90x90x9	HFLeq90x90x9	Hauteur	CS3 - HFLeq90x90x9	CS3 - HFLeq90x90x9	0.99
CS4 - IPE140A	IPE140A	Hauteur	CS4 - IPE140A	CS4 - IPE140A	0.98

Profilés modifiés :

- CS2 : IPE200 => IPE200O

▪ Itération n°4 :

4. Pas routine: 4

Section	Paramètre	Trier par	Section d'origine	AutoDesign de section	Contrôle AutoDesign []
CS1 - HEA160A	HEA160A	Hauteur	CS1 - HEA160	CS1 - HEA160A	0.98
CS2 - IPE200O	IPE200O	Hauteur	CS2 - IPE200O	CS2 - IPE200O	0.89
CS3 - HFLeq90x90x9	HFLeq90x90x9	Hauteur	CS3 - HFLeq90x90x9	CS3 - HFLeq90x90x9	0.97
CS4 - IPE140A	IPE140A	Hauteur	CS4 - IPE140A	CS4 - IPE140A	0.98

Profilés modifiés :

CS1 : HEA160 => HEA160A

▪ Itération n°5 :

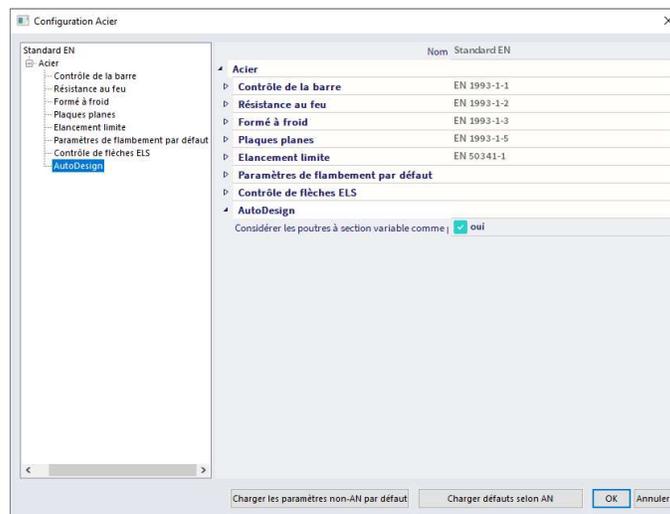
5. Pas routine: 5

Section	Paramètre	Trier par	Section d'origine	AutoDesign de section	Contrôle AutoDesign []
CS1 - HEA160A	HEA160A	Hauteur	CS1 - HEA160A	CS1 - HEA160A	0.90
CS2 - IPE200O	IPE200O	Hauteur	CS2 - IPE200O	CS2 - IPE200O	0.96
CS3 - HFLeq90x90x9	HFLeq90x90x9	Hauteur	CS3 - HFLeq90x90x9	CS3 - HFLeq90x90x9	0.98
CS4 - IPE140A	IPE140A	Hauteur	CS4 - IPE140A	CS4 - IPE140A	0.98

Nous avons saisi 6 itérations maximales, mais comme les sections restent les mêmes lors de la dernière itération, le processus s'arrête alors après seulement 5 itérations.

7.3. Eléments à inertie variable

Depuis SCIA Engineer 17.0, un paramètre est disponible pour effectuer l'autodesign des éléments variables. Ce paramètre se trouve dans le processus « Acier » dans la « Configuration Acier » :



Lorsque ce paramètre est activé (paramètre par défaut), l'élément est considéré comme « prismatique » (c'est-à-dire une section) pendant le calcul autodesign. Cela accélère le calcul.

Chapitre 8: Calcul au second ordre et imperfections

8.1. Aperçu

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 :

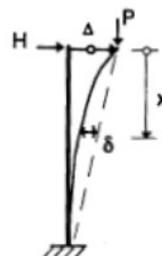
- d'effets du second ordre locaux ou sur un élément, appelés effets P- δ ,
- et d'un effet du second ordre global, appelés effets P- Δ .



$$M(x) = Hx$$

$$M(L) = HL$$

Théorie du
premier ordre



$$M(x) = Hx + P\delta + P\Delta x/L$$

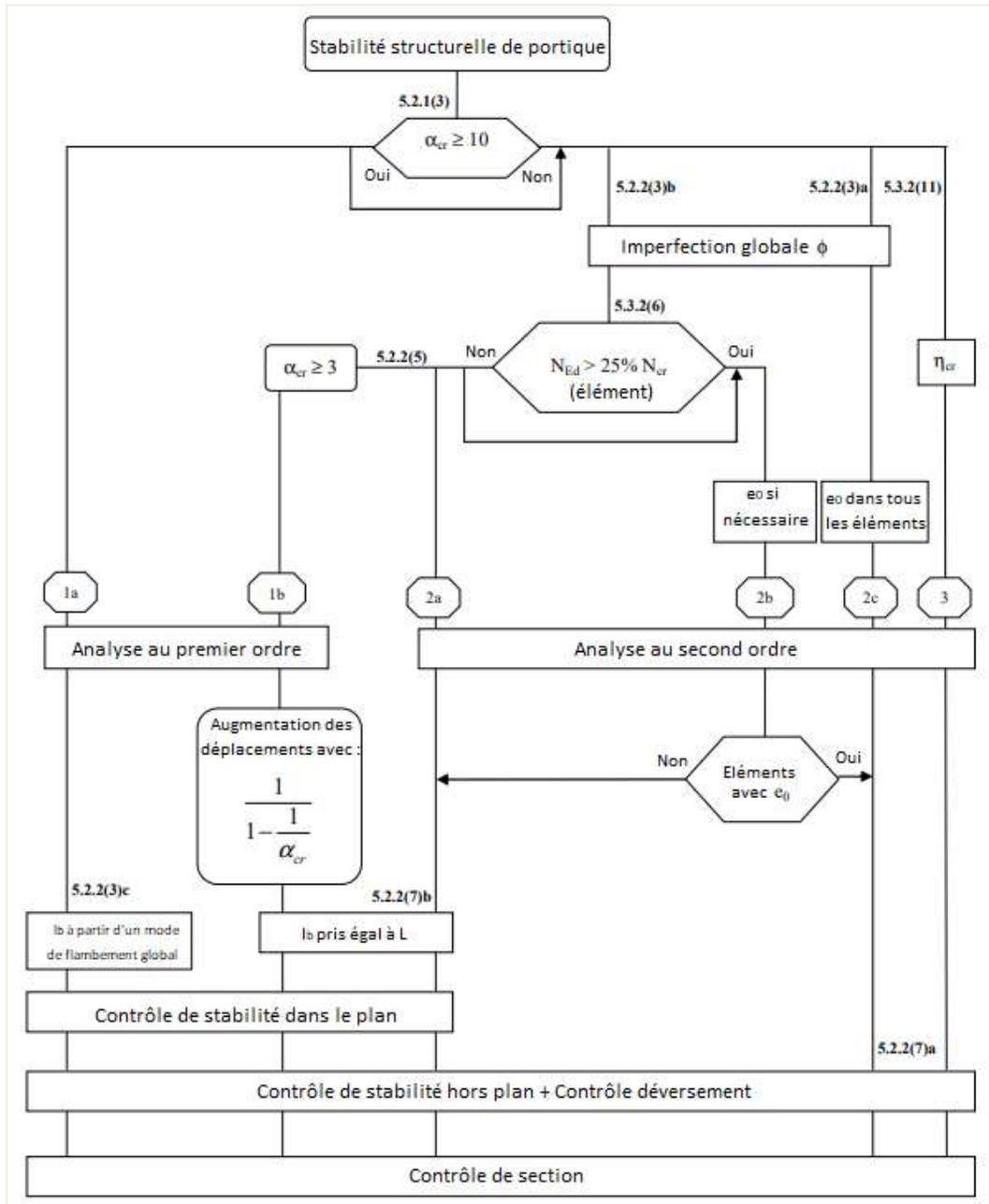
$$M(h) = HL + P\Delta$$

Théorie du
second ordre

Les pages suivantes proposent 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 ($\alpha_{cr} > 10$) sera expliquée dans l'EN 1993-1-1 art. 5.2.1(3).
- Dans cet aperçu, trois chemins sont définis :
 - o Chemin 1 : dans ce chemin, un calcul au premier ordre sera effectué.
 - o Chemin 2 : dans ce chemin, un calcul au second ordre sera effectué avec les imperfections globales (et si nécessaire locales / en arc).
 - o 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.
- Dans les prochains paragraphes, les règles de cet aperçu seront expliquées.



Avec :

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

8.2. Alpha critique

Le calcul du alpha critique est effectué par un calcul de stabilité dans SCIA Engineer.

Selon l'EN 1993-1-1, l'analyse au premier ordre pourrait être utilisée pour une structure, si l'augmentation des efforts internes ou moments significatifs, ou de toutes autres modifications du comportement structurelle dues aux déformations, peut être négligée. Cette condition pourrait être satisfaite si, pour une analyse élastique:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10$$

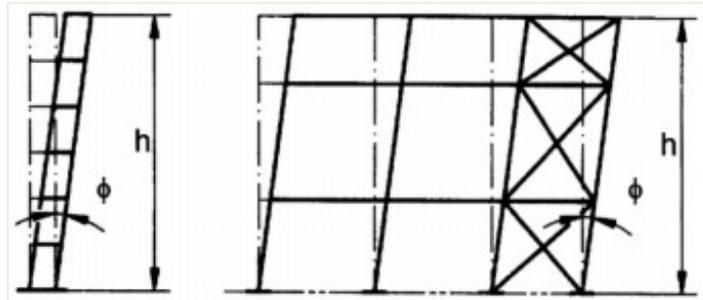
Avec :

- α_{cr} coefficient par lequel la charge de calcul doit être augmentée pour causer l'instabilité élastique dans un mode global.
- F_{Ed} charge de calcul sur la structure
- F_{cr} charge de flambement critique élastique pour l'instabilité globale, basé sur la raideur élastique initiale.

Si α_{cr} est plus petit que 10, un calcul au second ordre doit être effectué. En fonction du type d'analyse, les imperfections locales et globales doivent être prises en compte.

L'EN 1993-1-1 prescrit que les effets du second ordre et les imperfections peuvent être prises en compte tous les deux par l'analyse globale ou partiellement par l'analyse globale et partiellement à travers les contrôles de stabilité individuels des éléments.

8.3. Imperfection globale de portique φ



L'imperfection globale de portique sera saisie pour la structure entière par une valeur d'imperfection φ . Cette valeur peut être calculée par la formule suivante (EN 1993-1-1 art. 5.3.2(3)a) :

$$\varphi = \frac{1}{200} \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

Avec :

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$$

Mais :

$$\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

Et :

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

Et aussi :

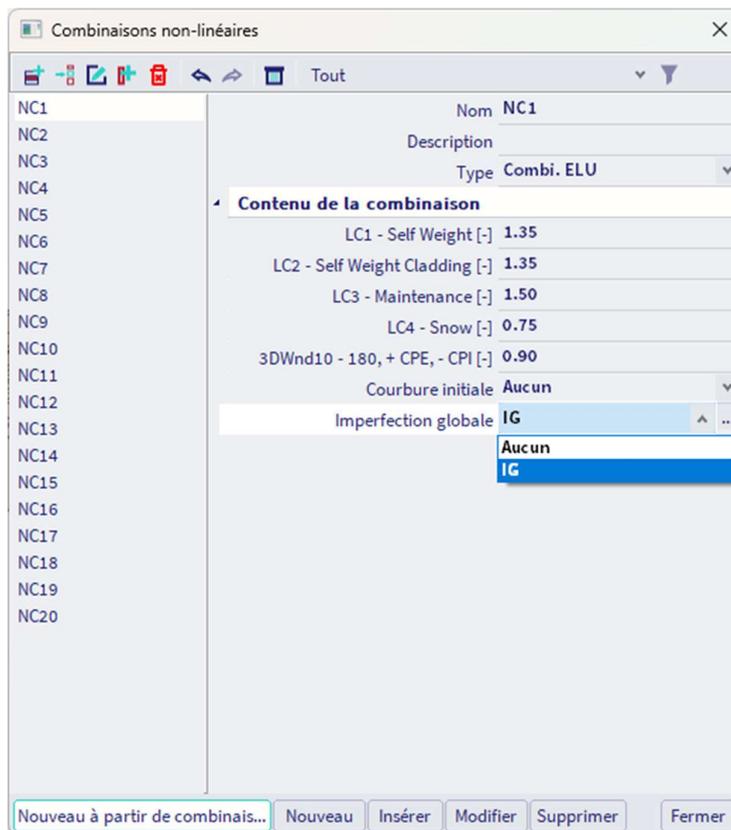
- h hauteur de la structure en mètres.
- m nombre de poteaux dans une rangée, en ne tenant compte que de ceux qui reprennent un effort normal N_{Ed} pas inférieur à 50% de la valeur moyenne de la charge verticale par poteau dans le plan considéré.

L'imperfection globale peut être saisie dans SCIA Engineer dans les combinaisons non linéaires, comme expliqué dans l'exemple ci-après.

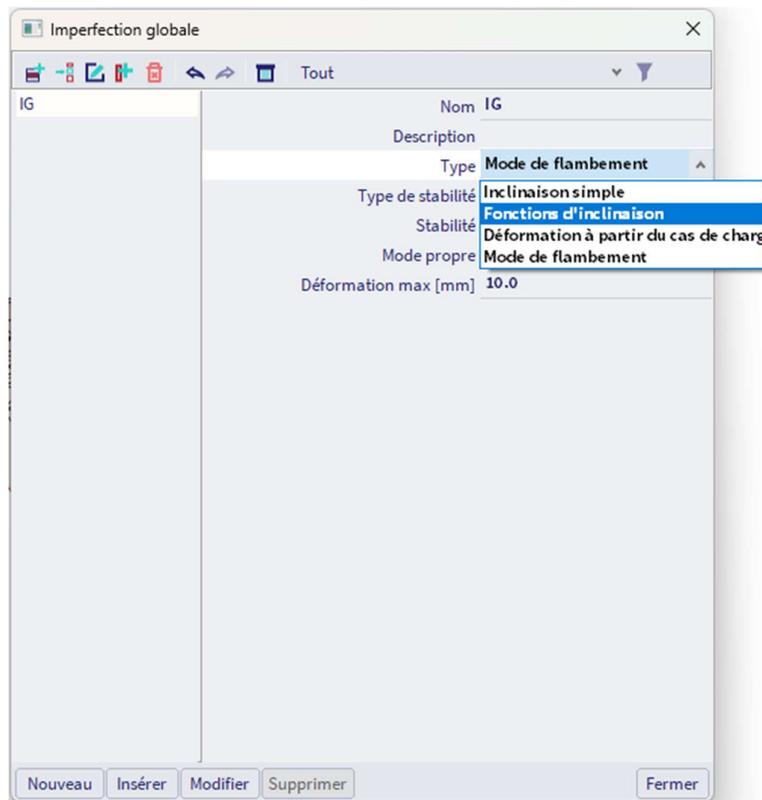
Exemple : Industrial Hall.esa

Dans cet exemple, deux fonctions d'imperfections globales seront utilisées : une selon l'axe X global et une autre selon l'axe Y global. Il n'est pas nécessaire de combiner les deux imperfections.

Dans SCIA Engineer, dans les combinaisons non-linéaires, vous pouvez choisir de n'appliquer aucune imperfection globale à cette combinaison NL ...



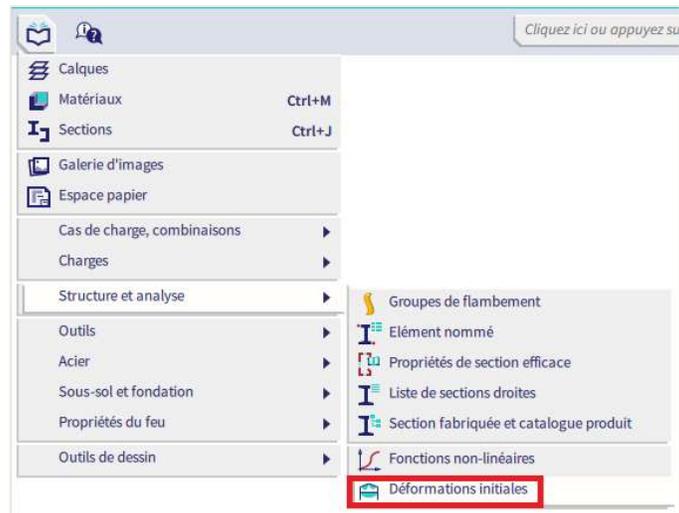
... ou bien de lui en appliquer une, « IG », à définir parmi quatre options depuis le menu « Bibliothèques / Cas de charge, combinaisons / Imperfections globales » :



- « **Inclinaison simple** » : vous saisissez une déformation dans la direction X et/ou Y globale comme l'imperfection en mm/m de hauteur dans la direction Z globale.
- « **Fonctions d'inclinaison** » : saisie d'une fonction d'inclinaison utilisateur ou d'une fonction d'inclinaison de l'EN 1993-1-1 (cette fonction est explicité ci-après).
- « **Déformation à partir du cas de charge** » : cette option vous permet de choisir un cas de charge calculé, puis la déformation de ce cas de charges sera utilisée comme imperfection globale initiale.
- « **Mode de flambement** » : l'imperfection sera dérivé des données de flambement.

Dans cet exemple, l'option « Fonctions d'inclinaison » a été choisie.

Ces fonctions d'inclinaison sont à entrer dans le menu principal « Bibliothèques » / « Structure et analyse » / « Déformations initiales » :



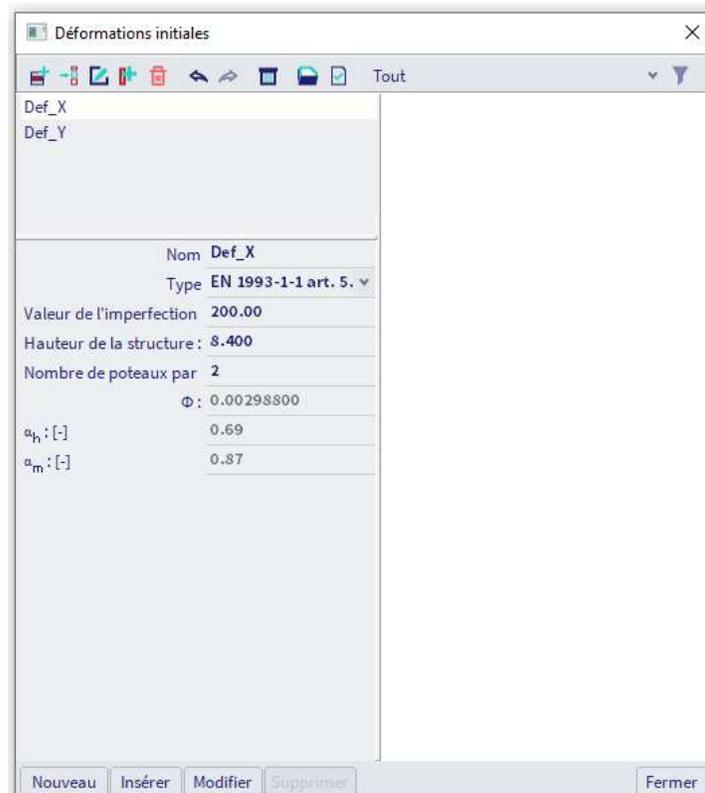
Le « Type » est choisi comme « EN 1993-1-1 art. 5.3.2(3) », avec une imperfection standard de 1/200.

La hauteur de la construction est de 8,4m pour les deux fonctions d'inclinaison.

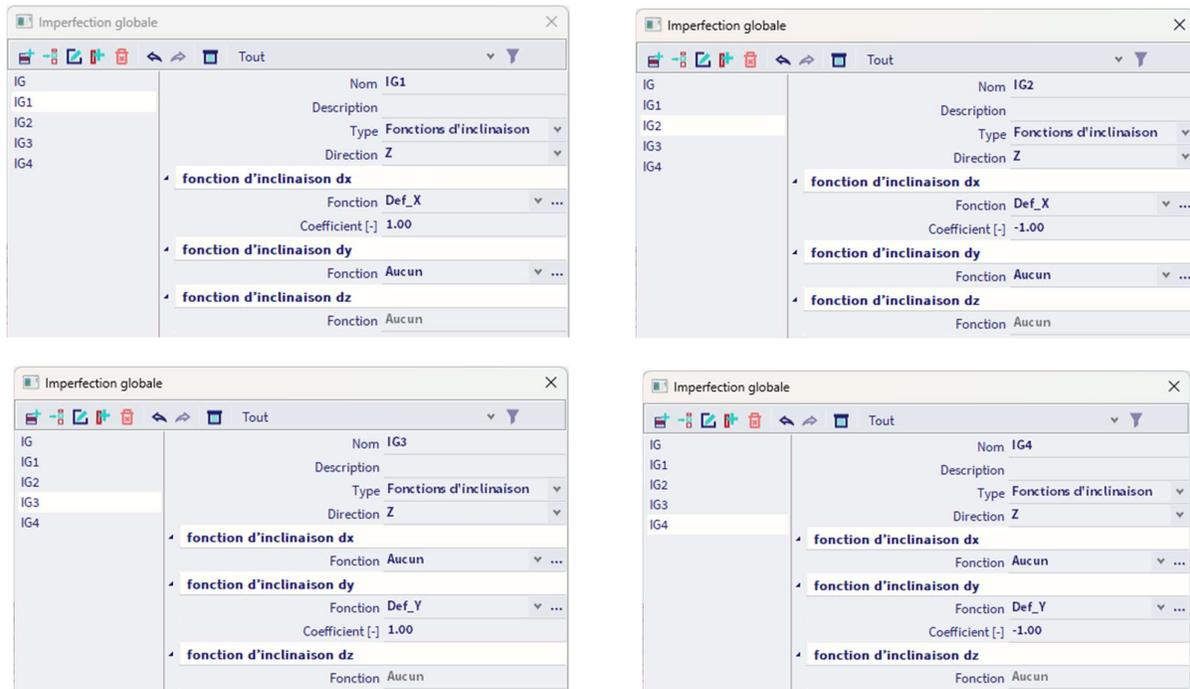
Il y a 6 poteaux dans la direction X, mais dans les travées centrales, deux poteaux seulement sont saisis. Comme une bonne partie de la structure n'a que 2 poteaux dans la direction X, dans cet exemple, nous prendrons le nombre de poteaux dans cette direction comme égal à 2.

Il y a 11 poteaux dans la direction Y. Mais les poteaux d'extrémité sont plus petits que deux du milieu. Alors, dans cet exemple, il a été décidé de ne saisir que 9 poteaux dans la direction Y.

La fonction d'inclinaison pour la direction X (Def_X) dans SCIA Engineer est affiché ci-après :



Le défaut d'aplomb pouvant être dans la direction +X, -X, +Y ou -Y, pour une même combinaison, il faut créer 4 fonctions d'inclinaison:



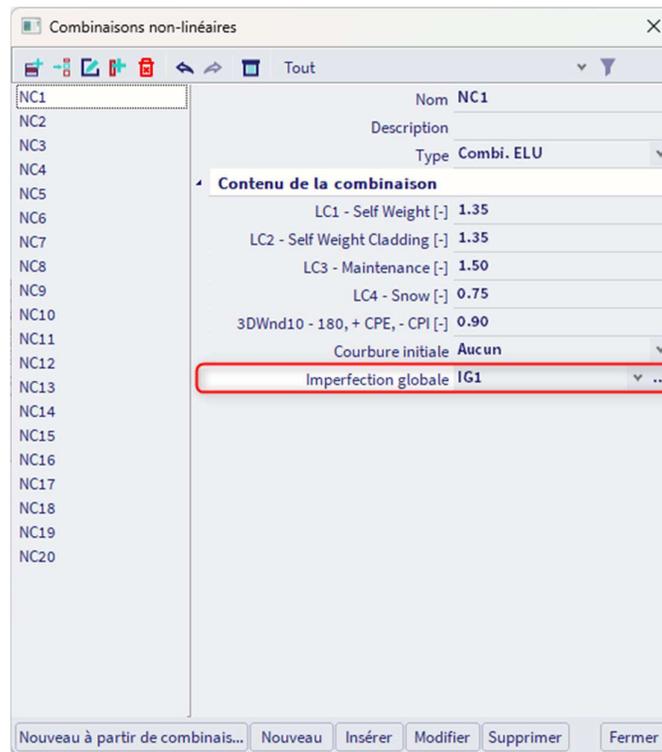
Dans cet exemple, 5 combinaisons non linéaires sont saisies :

- (1,35 * « Self Weight ») + (1,35 * « Self Weight Cladding ») + (1,5 * « Maintenance ») + (0,75 * « Snow ») + (0,9 * « 3DWind10 »)
- (1,35 * « Self Weight ») + (1,35 * « Self Weight Cladding ») + (0,75 * « Snow ») + (1,5 * « 3DWind13 »)
- (1,35 * « Self Weight ») + (1,35 * « Self Weight Cladding ») + (0,75 * « Snow ») + (1,5 * « 3DWind14 »)
- (1,35 * « Self Weight ») + (1,35 * « Self Weight Cladding ») + (0,75 * « Snow ») + (1,5 * « 3DWind15 »)
- (1,35 * « Self Weight ») + (1,35 * « Self Weight Cladding ») + (0,75 * « Snow ») + (1,5 * « 3DWind16 »)

Toutes les combinaisons sont donc saisies 4 fois avec la fonction d'inclinaison correspondante :

- NC1-NC5 : inclinaison dans la direction X positive : IG1
- NC6-NC10 : inclinaison dans la direction X négative : IG2
- NC11-NC15 : inclinaison dans la direction Y positive : IG3
- NC16-NC20 : inclinaison dans la direction Y négative : IG4

Astuce pour la création des combinaisons NL : Les combinaisons non-linéaires peuvent être copiées à partir des combinaisons linéaires en utilisant l'option « Nouveau à partir de combinaisons linéaires ». Si des combinaisons enveloppes ou issues de la norme étaient utilisés pour le calcul linéaire, celui-ci doit d'abord être effectué avant que les combinaisons ne soient créées.



8.4. Imperfection en arc e_0

8.4.1. $N_{Ed} > 25\% \cdot N_{Cr}$

L'imperfection locale en arc initiale relative d'éléments pour le flambement flexionnel est donnée par la valeur e_0/L .

Cette imperfection en arc ne doit pas être appliquée sur chacun des éléments, comme décrit dans l'EN 1993-1-1 art. 5.3.2(6) :

(6) Les imperfections locales en arc des barres peuvent être négligées lors de l'analyse globale de l'ossature pour la détermination des sollicitations d'extrémité à utiliser dans les vérifications de barres selon 6.3. Cependant, dans le cas d'ossatures sensibles aux effets du second ordre, il convient d'introduire dans l'analyse structurale de l'ossature et en plus des imperfections globales d'aplomb (voir 5.2.1(3)), ces imperfections locales en arc pour chaque barre comprimée pour laquelle les deux conditions suivantes sont satisfaites :

— au moins un assemblage d'extrémité de la barre transmet un moment ;

$$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}} \quad \dots (5.8)$$

où :

N_{Ed} est la valeur de calcul de l'effort normal de compression ;

et :

$\bar{\lambda}$ est l'élanement réduit dans le plan, calculé pour la barre considérée comme articulée à ses extrémités.

NOTE Les imperfections locales en arc sont prises en compte dans les vérifications des barres, voir 5.2.2 (3) et 5.3.4.

Donc :

$$\sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} > 0,5 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}} \text{ ou } \frac{1}{N_{cr}} > 0,25 \text{ ou } N_{Ed} > 0,25 \cdot N_{cr}$$

L'imperfection en arc doit donc être appliquée lorsque l'effort normal N_{Ed} dans un élément est supérieur à 25% de l'effort critique de l'élément.

8.4.2. Imperfection en arc e_0

L'imperfection en arc initial s'écrit :

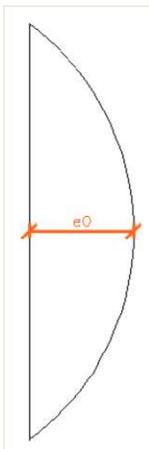


Tableau 5.1 — Valeurs de calcul de l'imperfection locale initiale en arc e_0/L

Courbe de flambement selon Tableau 6.1	Analyse élastique	Analyse plastique
	e_0/L	e_0/L
a_0	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

L est la longueur de l'élément.

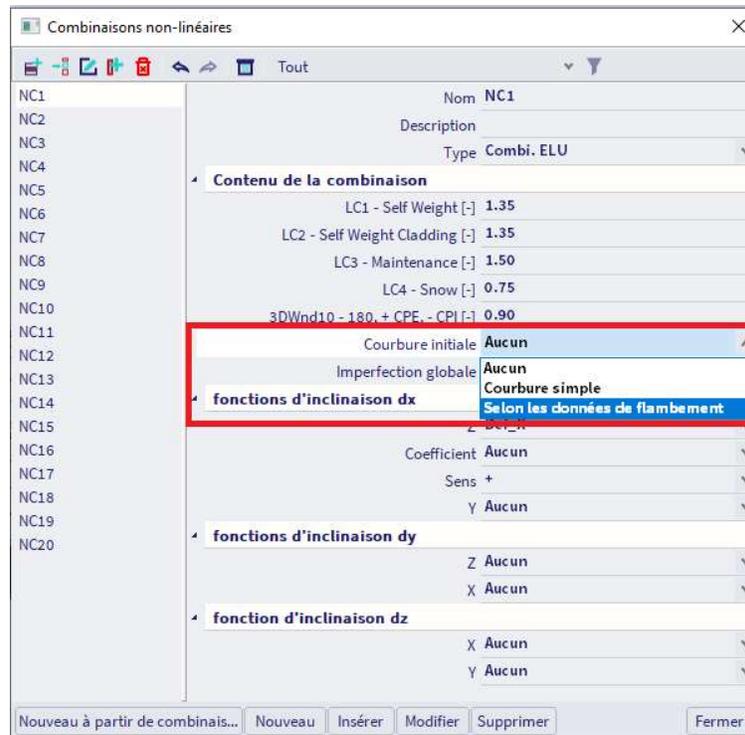
Comme expliqué dans le chapitre précédent, l'imperfection en arc doit donc être appliquée lorsque l'effort normal N_{Ed} dans un élément est supérieur à 25% de l'effort critique de l'élément. Si $N_{Ed} < 25\% \cdot N_{cr}$, vous avez le choix d'appliquer ou non cette imperfection en arc.

La courbe de flambement utilisée pour le calcul de l'imperfection est la courbe saisie dans la bibliothèque de sections. Pour les sections standards, la courbe selon la norme est automatiquement utilisée ; pour des sections non standards (comme les sections générales / quelconques), il vous faut saisir la courbe de flambement manuellement.

Exemple : Industrial Hall.esa

Dans SCIA Engineer, vous avez le choix entre trois options pour les imperfections en arc dans les combinaisons non linéaires :

- « **Aucun** » : aucune imperfection en arc ne sera prise en compte.
- « **Courbure simple** » : vous devrez saisir une déformation « f » ou « $1/f$ » pour tous les éléments, avec « $1/f$ » correspondant à la valeur « e_0/L » comme expliqué précédemment.
- « **Selon les données de flambement** » : avec cette option, vous pouvez choisir une imperfection locale comme définie dans les données de flambement, donc pour chaque élément suivant sa propre courbe de flambement (cette option est explicitée ci-après).

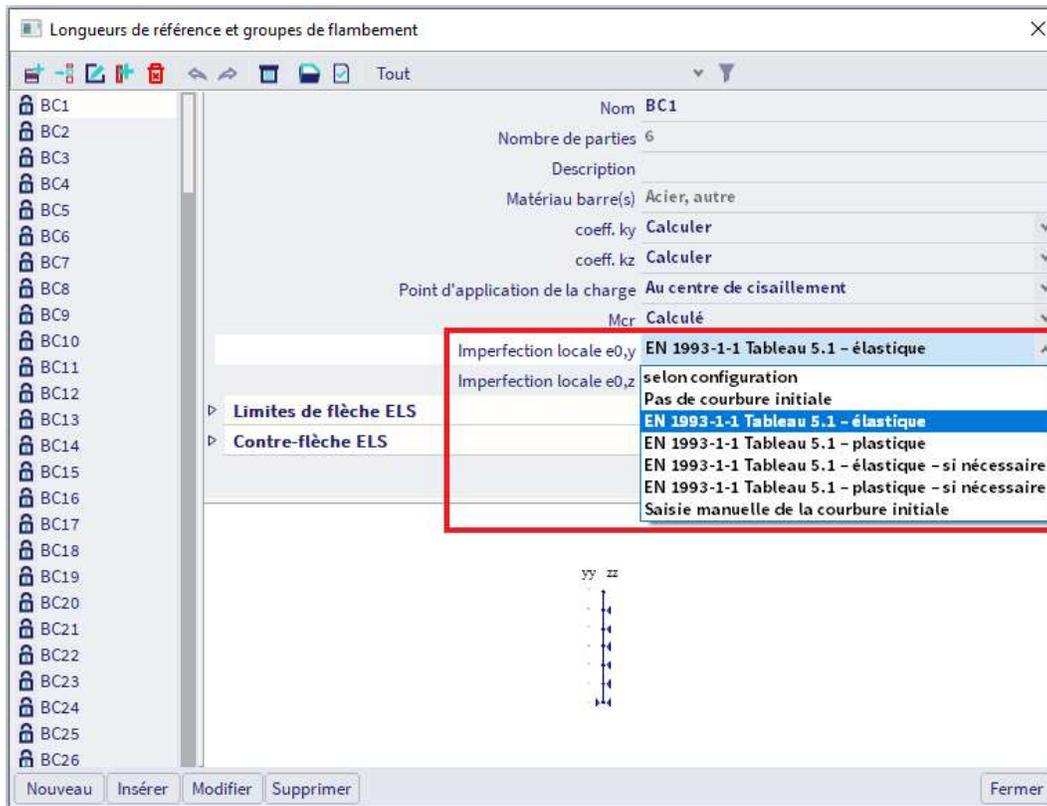


Dans cet exemple, l'option « Selon les données de flambement » a été choisie.

Les données de flambement peuvent être saisies dans le processus « Acier » / « Groupes de flambement ».

Vous pouvez choisir entre 7 options :

- « **Selon configuration** » : les imperfections en arc prises en compte seront celles définies dans le processus « Acier » / « Configuration Acier », dans la partie « Paramètres de flambement par défaut ».
- « **Pas de courbure initiale** » : aucune imperfection en arc ne sera prise en compte.
- « **EN 1993-1-1 Tableau 5.1 - élastique** » : la valeur élastique suivant la courbe de flambement de la section sera utilisée.
- « **EN 1993-1-1 Tableau 5.1 - plastique** » : la valeur plastique suivant la courbe de flambement de la section sera utilisée.
- « **EN 1993-1-1 Tableau 5.1 - élastique si nécessaire** » : la valeur élastique suivant la courbe de flambement de la section sera utilisée si $N_{Ed} > 25\% \cdot N_{cr}$
- « **EN 1993-1-1 Tableau 5.1 - plastique si nécessaire** » : la valeur plastique suivant la courbe de flambement de la section sera utilisée si $N_{Ed} > 25\% \cdot N_{cr}$
- « **Saisie manuelle de la courbe initiale** » : vous pouvez saisir une valeur manuellement pour cette imperfection en arc.

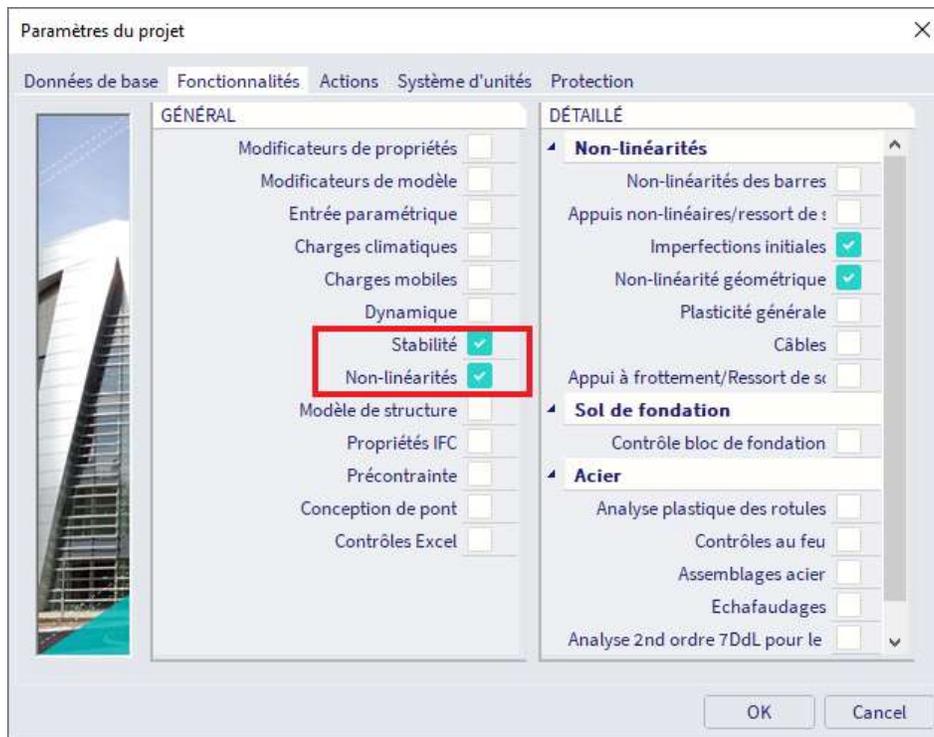


Dans cet exemple, pour toutes les poutres, l'imperfection en arc « EN 1993-1-1 Tableau 5.1 – élastique » a été saisie. Aucune imperfection en arc n'a été saisie uniquement pour les diagonales.

8.5. Mode de flambement comme imperfection - η_{cr}

Comme alternative, les imperfections globales et en arc peuvent être remplacées par le mode de flambement comme imperfection (chemin 3 du diagramme global).

Pour saisir les imperfections géométriques, les fonctionnalités « **Non-linéarités** » / « **Imperfections initiales** » et « **Stabilité** » doivent être activées :



Tout d'abord, le calcul en stabilité (linéaire ou non linéaire) doit être calculé. Ensuite, dans les combinaisons non linéaires, vous pouvez choisir le mode de flambement que vous souhaitez prendre en compte. Il vous faut choisir la combinaison de stabilité puis le mode calculé :



La dernière option à saisir est la déformation maximale. Il s'agit de la déformation du nœud la plus importante de la structure. SCIA Engineer recalculera tous les déplacements des autres nœuds en utilisant cette déformation maximale.

Comme le mode de flambement est sans dimension, l'EN 1993-1-1 donne la formule pour expliquer l'amplitude η_{init} de l'imperfection. Dans l'exemple ci-dessous, ce calcul est présenté pour un exemple simple.

Exemple : Buckling Shape.esa

Dans cet exemple, la procédure pour calculer une forme de flambement est illustrée pour un poteau.

Le poteau a une section IPE300, est fabriqué en S235 et a les propriétés suivantes :



$E = 210000\text{N/mm}^2$
 $f_y = 235\text{N/mm}^2$
 $\gamma_{M1} = 1,00$
 $L = 5000\text{mm}$
 $A = 5380\text{mm}^2$
 $I_y = 83560000\text{mm}^4$
 $I_z = 6040000\text{mm}^4$
 $W_{pl,y} = 628400\text{mm}^3$
 $W_{pl,z} = 125000\text{mm}^3$

▪ **Calcul de la forme de flambement**

Tout d'abord, un calcul en stabilité est effectué en utilisant une charge de 1kN. De cette manière, la charge critique élastique N_{cr} est obtenue.

Pour des résultats plus précis, le « Nombre moyen d'éléments de maillage 1D sur les éléments 1D droits » est de 10. Cela peut être fait dans le menu principal « Outils » / « Calcul et maillage » / « Paramètres du maillage ». De plus, dans la « Configuration avancée du solveur », les « Déformations d'effort tranchant » ont été négligées, donc les résultats peuvent être vérifiés par un calcul manuel.

Le calcul en stabilité donne les résultats suivants pour les coefficients de charge critique :

Multiplicateurs de charge critiques	
N	f
Comb. de stabilité : S1	
1	500.75
2	2003.39
3	4511.38
4	6927.50

Cela peut se vérifier avec la formule d'Euler, en utilisant la longueur de l'élément comme longueur de flambement :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^2 * 210000\text{N/mm}^2 * 8,3560 * 10^7\text{mm}^4}{(5000\text{mm})^2} = 6927,51\text{kN}$$

Pour l'axe faible, nous pouvons calculer N_{cr} avec I_z , on aura 500,77kN.

Le dessin ci-dessous montrer les nœuds de maillage du poteau et la forme de flambement correspondante :

Déformations 1D

Calcul de stabilité. Les formes de flambement sont normalisées de telle façon que la valeur maximale de composante de déplacement (resp. rotation) de chaque mode est égale à 1m (resp. 1 rad).

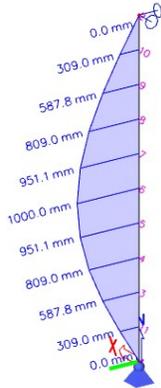
Combinaisons de stabilité: S1/1 - 500.75

Système de coordonnées: Principal

Extrême 1D: Non

Sélection: Tout

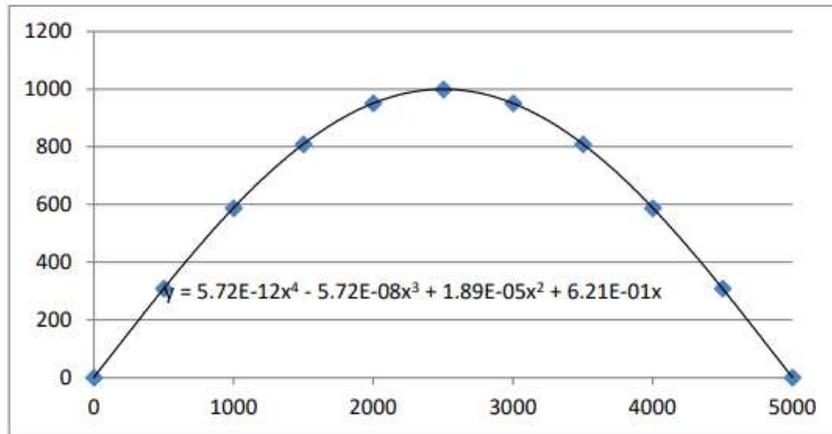
Déformations



Nom	dx [m]	Cas	u _x [mm]	u _y [mm]	u _z [mm]	φ _x [mrad]	φ _y [mrad]	φ _z [mrad]
B1	0.000	S1/1 - 500.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	628.3
B1	0.500-	S1/1 - 500.75	0.0	309.0	0.0	0.0	0.0	597.6
B1	0.500+	S1/1 - 500.75	0.0	309.0	0.0	0.0	0.0	597.6
B1	1.000-	S1/1 - 500.75	0.0	587.8	0.0	0.0	0.0	508.3
B1	1.000+	S1/1 - 500.75	0.0	587.8	0.0	0.0	0.0	508.3
B1	1.500-	S1/1 - 500.75	0.0	809.0	0.0	0.0	0.0	369.3
B1	1.500+	S1/1 - 500.75	0.0	809.0	0.0	0.0	0.0	369.3
B1	2.000-	S1/1 - 500.75	0.0	951.1	0.0	0.0	0.0	194.2
B1	2.000+	S1/1 - 500.75	0.0	951.1	0.0	0.0	0.0	194.2
B1	2.500-	S1/1 - 500.75	0.0	1000.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B1	2.500+	S1/1 - 500.75	0.0	1000.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B1	3.000-	S1/1 - 500.75	0.0	951.1	0.0	0.0	0.0	-194.2
B1	3.000+	S1/1 - 500.75	0.0	951.1	0.0	0.0	0.0	-194.2
B1	3.500-	S1/1 - 500.75	0.0	809.0	0.0	0.0	0.0	-369.3
B1	3.500+	S1/1 - 500.75	0.0	809.0	0.0	0.0	0.0	-369.3
B1	4.000-	S1/1 - 500.75	0.0	587.8	0.0	0.0	0.0	-508.3
B1	4.000+	S1/1 - 500.75	0.0	587.8	0.0	0.0	0.0	-508.3
B1	4.500-	S1/1 - 500.75	0.0	309.0	0.0	0.0	0.0	-597.6
B1	4.500+	S1/1 - 500.75	0.0	309.0	0.0	0.0	0.0	-597.6
B1	5.000	S1/1 - 500.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-628.3

Vous pouvez demander ces résultats à partir des « Déformations 3D » ou des « Déformations 1D ».

En utilisant une feuille Excel par exemple, la forme de flambement peut être approximée par un polynôme de degré 4.



Un polynôme a l'avantage que la deuxième dérivée peut facilement être calculée :

$$\eta_{cr} = (5,72 \cdot 10^{-12} \cdot x^4) - (5,72 \cdot 10^{-8} \cdot x^3) + (1,89 \cdot 10^{-5} \cdot x^2) + (6,21 \cdot 10^{-1} \cdot x)$$

$$\eta_{cr,max} = (6,86 \cdot 10^{-11} \cdot x^2) - (3,43 \cdot 10^{-7} \cdot x) + (3,78 \cdot 10^{-5})$$

- **Calcul de e₀**

$$e_0 = \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) * \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} * \frac{1 - \chi \cdot (\bar{\lambda})^2}{1 - \chi \cdot (\bar{\lambda})^2} = \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) * \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}}$$

Avec :

$$N_{Rk} = f_y * A = 235\text{N/mm}^2 * 5380\text{mm}^2 = 1264300\text{N}$$

$$M_{Rk} = f_y * W_{pl} = 235\text{N/mm}^2 * 628400\text{mm}^3 = 147674000\text{N.mm (classe 2)}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{N_{Rk}/N_{cr}} = \sqrt{1264300\text{N}/6885280\text{N}} = 0,43$$

$\alpha = 0,21$ pour une courbe de flambement « a »

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{\left\{0,5 * [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + (\bar{\lambda})^2]^2\right\} + \sqrt{\left\{0,5 * [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + (\bar{\lambda})^2]^2\right\} - (\bar{\lambda})^2}}} = 0,945$$

Ces résultats intermédiaires peuvent être vérifiés dans SCIA Engineer lors du contrôle ELU sur le poteau :

Contrôle flambement flexionnel				
Selon EN 1993-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.46)				
Paramètres de flambement		yy	zz	
		déplaçable	non-déplaçable	
Noeuds déplaçables		déplaçable	non-déplaçable	
Longueur système	L	5.000	5.000	m
Coefficient de flambement	k	1.00	1.00	
Longueur de flambement	l_{cr}	5.000	5.000	m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	6927.51	500.77	kN
Elancement	λ	40.12	149.22	
Elancement relatif	$\bar{\lambda}_{rel}$	0.43	1.59	
Elancement limite	$\bar{\lambda}_{rel,0}$	0.20	0.20	

$$e_0 = 0,21 * (0,43 - 0,2) * \frac{147674000\text{N.mm}}{1264300\text{N}} = 5,573\text{mm}$$

▪ **Calcul de η_{init}**

Les paramètres requis ont maintenant été calculés, donc cette dernière étape consiste à déterminer l'amplitude de l'imperfection.

La section centrale du poteau est décisive : $x = 2500\text{mm}$.

$$\eta_{cr} \text{ en milieu de section} = 1000,31$$

$$\eta_{cr,max} \text{ en milieu de section} = -3,912 \cdot 10^{-4} \cdot 1/\text{mm}^2$$

$$\eta_{init} = e_0 * \frac{N_{cr}}{E * I_y * \eta_{cr,max}} * \eta_{cr}$$

$$\eta_{init} = 5,642\text{mm} * \frac{6885280\text{N}}{210000 \text{ N/mm}^2 * 83560000\text{mm}^4 * 3,912 \cdot 10^{-4} \cdot 1/\text{mm}^2} * 1000$$

$$\eta_{init} = 5,629\text{mm}$$

Cette valeur peut maintenant être saisie comme amplitude de la forme de flambement pour imperfection :



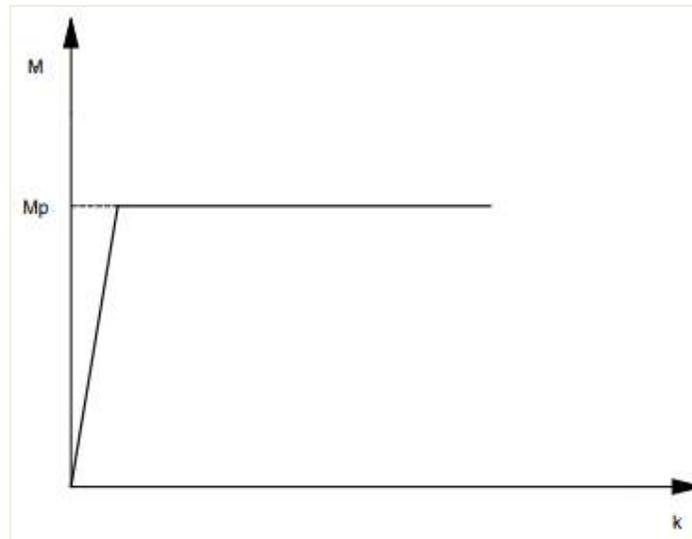
Chapitre 9: Non-linéarité physique

Lorsque les contraintes dépendent des déformations de manière non linéaire, la non-linéarité est appelée « Non-linéarité physique ».

9.1. Rotules plastiques

Lorsqu'un calcul linéaire normal est effectué et que la contrainte limite est atteinte dans plusieurs parties de la structure, les dimensions des éléments critiques doivent alors être augmentées. Si par contre, les rotules plastiques sont prises en compte, l'atteinte de la contrainte limite entraîne alors la formation de rotules plastiques aux assemblages appropriés et le calcul peut continuer avec une autre itération. La contrainte est redistribuée dans les autres parties de la structure et on obtient une meilleure utilisation de la capacité portante de la structure.

Le matériau se comporte de manière linéaire élastique jusqu'à ce que la limite plastique soit atteinte, le comportement devient alors totalement plastique. Le diagramme $\sigma - \varepsilon$ a ainsi la même forme que le diagramme Moment-Courbure :



Le moment plastique total est donné par M_p , la courbure par k .

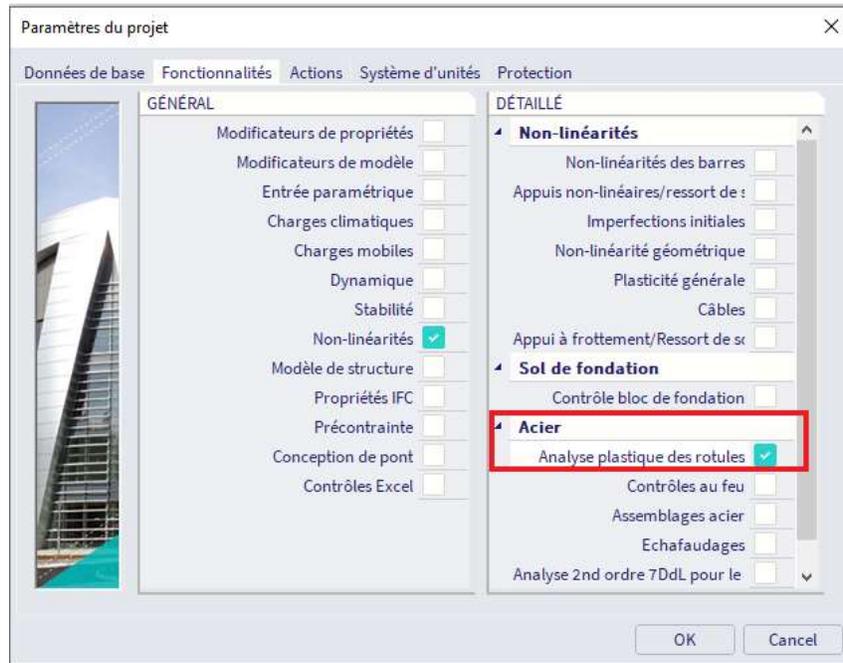
Dans SCIA Engineer, un moment plastique ne peut se produire que dans un nœud de maillage. Cela implique que le maillage doit être raffiné si une rotule plastique est attendue à un autre endroit qu'aux extrémités.

La réduction du moment plastique a été implémentée conformément aux normes suivantes : EC3, DIN 18800 et NEN 6770.

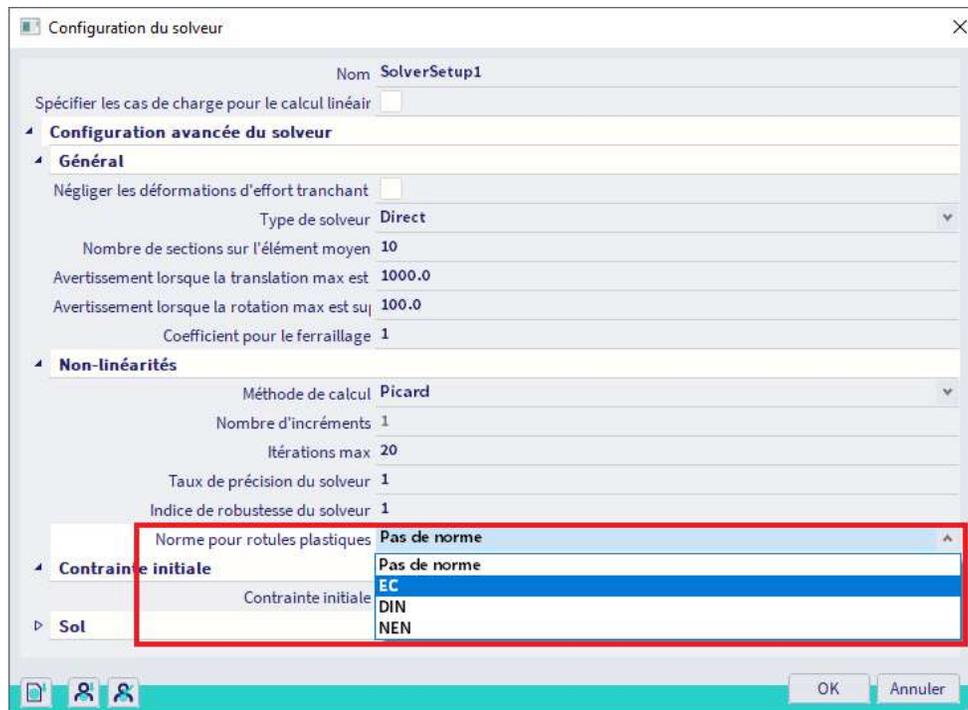
Il existe bien sûr un risque lorsque les rotules plastiques sont prises en compte. Si une rotule est ajoutée à la structure, l'indétermination statique est réduite. Si d'autres rotules sont ajoutées, il se peut que la structure devienne un mécanisme. Cela entraînerait l'effondrement de la structure et le calcul (non linéaire) serait arrêté.

D'un autre côté, les rotules plastiques peuvent être utilisées pour calculer la marge de fiabilité plastique de la structure. La charge appliquée peut être augmentée petit à petit (c'est-à-dire en augmentant les coefficients des cas de charges dans une combinaison) jusqu'à ce que la structure s'effondre. Cette approche peut être utilisée pour déterminer le multiple de la charge maximale que la structure peut supporter.

Pour prendre en compte les rotules plastiques dans les structures en acier, la fonctionnalité « Analyse plastique des rotules » doit être activée :



Le choix de la norme qui doit être appliquée peut être spécifiée dans le menu principal « Outils » / « Calcul et maillage » / « Configuration solveur » :



Exemple : Plastic_Hinges.esa

Dans ce projet, une poutre continue sera considérée. La poutre a une section IPE300 et est fabriquée en S235.

Selon l'Eurocode 3, le moment plastique autour de l'axe y est donné par :

$$M_{pl,y,d} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

Pour la poutre de ce projet, nous avons alors :

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

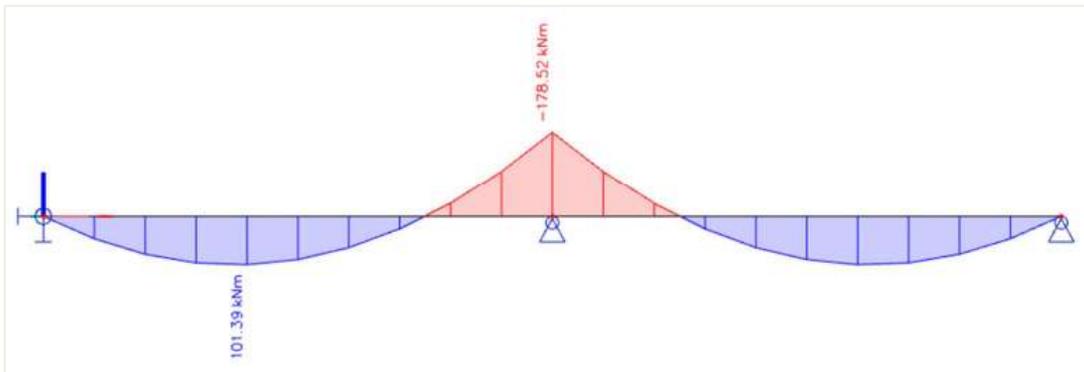
$$W_{pl,y} = 6,28 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

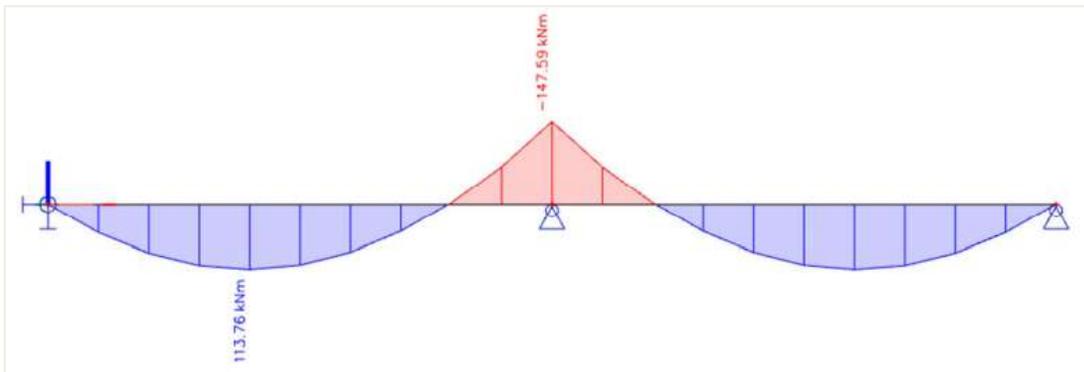
Et donc :

$$M_{pl,y,d} = 147,58 \text{ kN.m}$$

Une **analyse linéaire** montre le diagramme des moments suivant :



Une **analyse non-linéaire** prenant en compte les rotules plastiques donne les résultats suivants :



Lorsque la charge augmente au fur et à mesure, une autre rotule plastique se formera en milieu de travée et créera ainsi un mécanisme. Le calcul non linéaire s'arrêtera et un message de singularité s'affichera.

9.2. Analyse plastique générale

Une analyse plastique générale peut être effectuée pour n'importe quel élément 2D (plaques, murs et coques). La condition d'élasticité de Von Mises est disponible, ce qui est approprié pour les matériaux ductiles en général, comme les métaux (acier, aluminium, ...). C'est un comportement symétrique qui agit de la même manière en traction et en compression, avec ou sans durcissement dans la branche plastique.

Le comportement plastique des matériaux peut être combiné avec d'autres types de non-linéarités dans SCIA Engineer.

Note : La plasticité n'est pas supportée pour les éléments 1D. Les éléments 1D qui sont présents dans le modèle seront considérés comme élastiques.

9.2.1. Critère d'élasticité de Von Mises

Dans SCIA Engineer, est implémenté le critère d'élasticité de Von Mises.

Ce critère suggère que la déformation d'un matériau commence lorsque le second invariant de contrainte déviatorique J_2 atteint une valeur critique. C'est pourquoi cette théorie est parfois appelée Théorie de la plasticité J_2 ou du flux J_2 . Elle fait partie intégrante d'une théorie sur la plasticité qui s'applique idéalement aux matériaux ductiles, tels que les métaux. Avant de se déformer, la réponse du matériau est supposée être élastique.

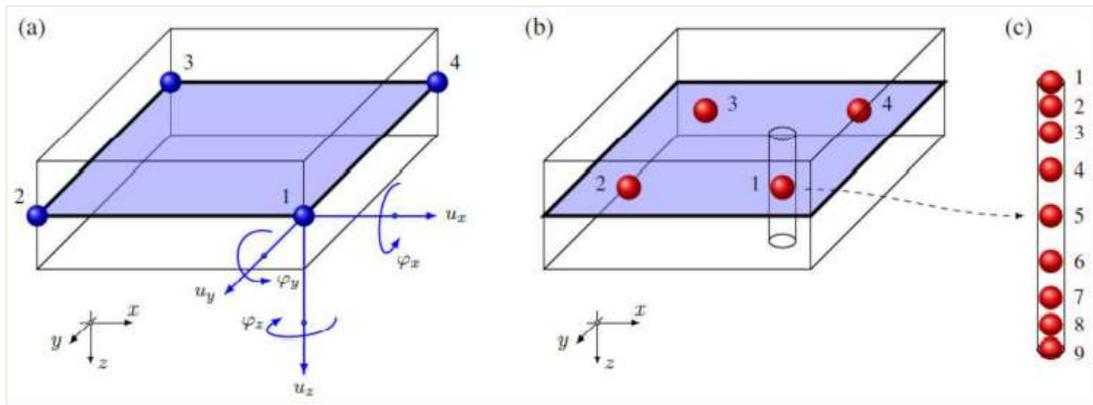
En science des matériaux et en ingénierie, le critère de plasticité de von Mises peut être également formulé en tant que contrainte de von Mises ou contrainte de traction équivalente, σ_E , valeur de contrainte pouvant être calculée à partir du tenseur des contraintes de Cauchy. Dans ce cas, on dit d'un matériau qu'il commence à se déformer lorsque sa contrainte de von Mises atteint une valeur critique connue sous le nom de limite d'élasticité, σ_y . La contrainte de von Mises permet d'estimer la déformation de matériaux pour toute condition de charge à partir des résultats de simples tests de traction uniaxiale. La contrainte de von Mises satisfait à la propriété énonçant que deux états de contrainte caractérisés par une énergie de distorsion équivalente présentent des contraintes de von Mises équivalentes.

Étant donné que le critère de plasticité de von Mises est indépendant du premier invariant de contrainte, I_1 , il peut être utilisé pour analyser la déformation plastique de matériaux ductiles tels que les métaux. En effet, le début de l'élasticité de ces matériaux ne dépend pas du composant hydrostatique du tenseur des contraintes.

9.2.2. Modèle Eléments finis

Les rotations percussions à chaque nœud sont utilisées pour un chargement dans le plan. Cela signifie qu'un élément a 6 degrés de liberté à chaque nœud et est par conséquent compatible avec d'autres types d'éléments (poutre / éléments solides).

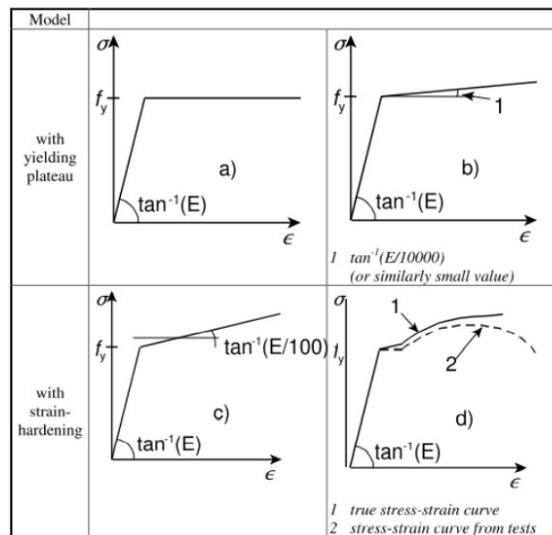
Dans les sections d'éléments, les points quadratiques 2x2 de Gauss sont utilisés. Chacun de ces points quadratiques de Gauss est réalisé par 9 points quadratiques Gauss-Lobatto à travers l'épaisseur, donc l'élément à 4 nœuds a $2 \times 2 \times 9 = 36$ points quadratiques au total.



Grâce à ces points de Gauss-Lobatto, l'élément peut gérer le chargement en flexion avec une haute précision. Dans chacun de ces points, le modèle non linéaire est calculé indépendamment en utilisant la formule de contrainte plane. La rigidité de cisaillement linéaire transversale est supposée.

9.2.3. Propriétés du matériau

La figure C.2 de l'EN 1993-1-5 est utilisée pour le comportement du matériau :



Les différents modèles sont :

- Élasto-plastique sans durcissement de déformation
- Élasto-plastique avec une pente au plateau nominal
- Élasto-plastique avec durcissement linéaire de la contrainte
- Réelle courbe contrainte-déformation modifiée à partir des résultats tests comme suit :

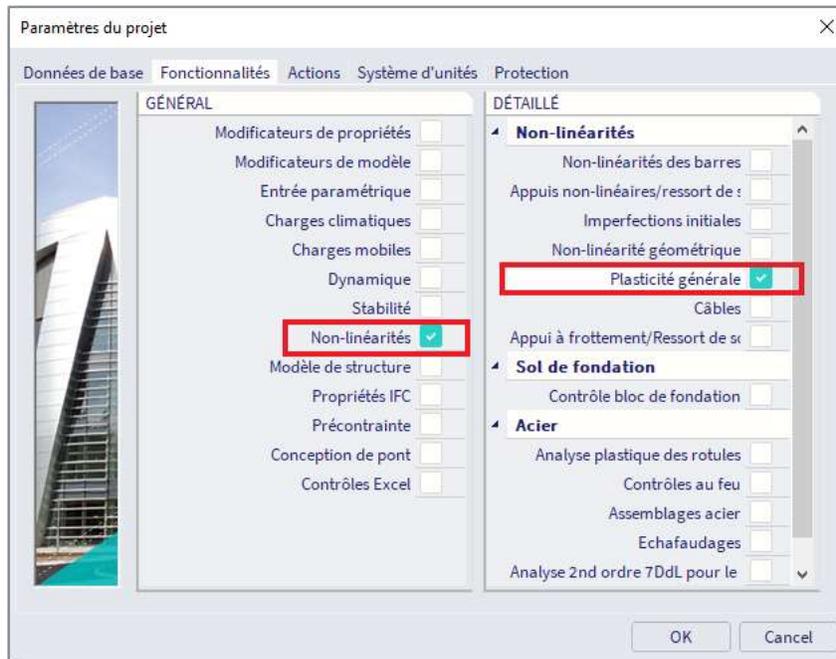
$$\sigma_{réelle} = \sigma * (1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_{réelle} = \ln * (1 + \epsilon)$$

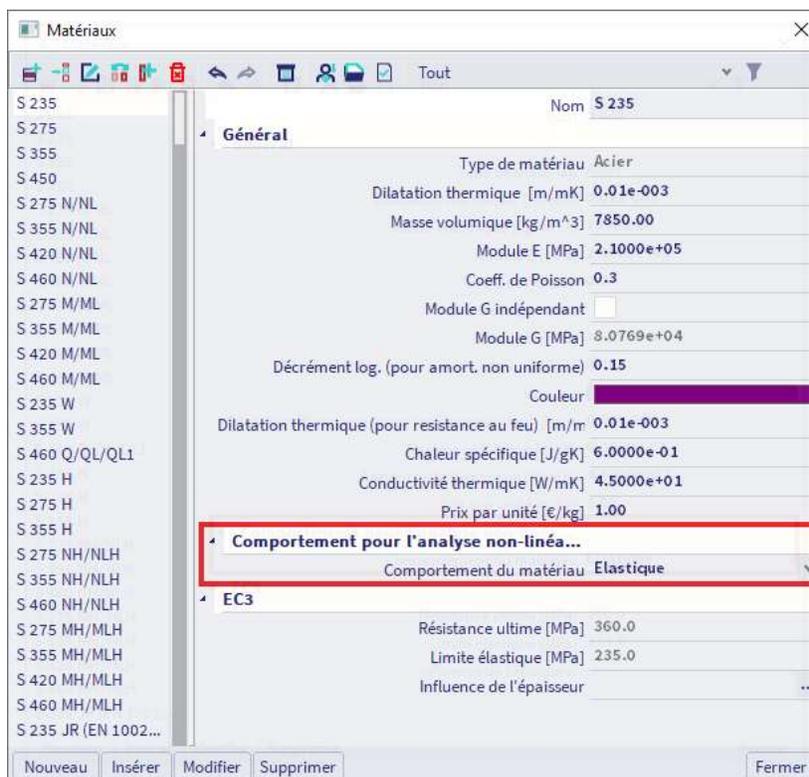
Dans SCIA Engineer, les modèles a), b) et c) sont implémentés.

9.2.4. Plasticité générale dans SCIA Engineer

La plasticité générale est un type spécifique de non linéarité dans SCIA Engineer. Cela signifie que la « Plasticité générale » est une sous-fonction de l'analyse non linéaire.



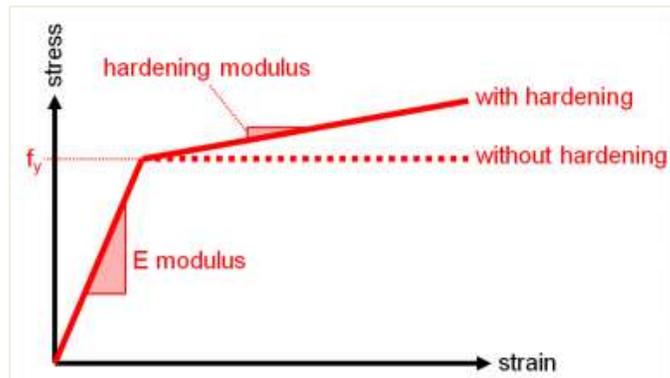
La non-linéarité des matériaux est définie directement dans la bibliothèque de matériaux. Voir le « comportement pour l'analyse non-linéaire » :



Par défaut, tous les matériaux de la bibliothèque sont définis comme élastique. Cela signifie que le matériau sélectionné se comportera de manière élastique pendant une analyse non linéaire. Les propriétés plastiques des matériaux sont génériques, indépendamment de la norme dans SCIA Engineer et sont par conséquent disponibles pour tout matériau, quelque soit la norme de calcul sélectionnée.

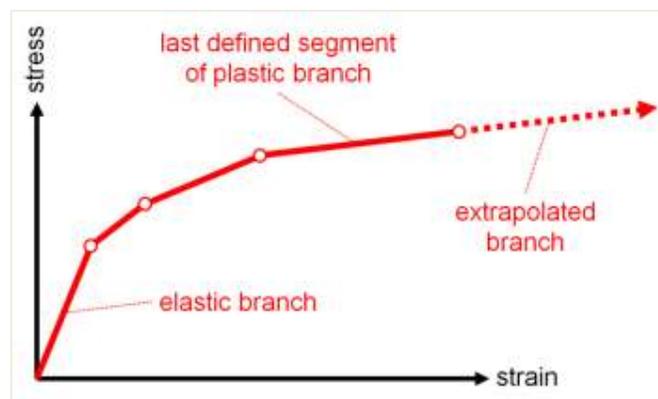
La plasticité peut être activée en sélectionnant un type de comportement plastique. Choisir par exemple le type « Élasto-plastique isotrope, Von Mises ». Il correspond à une relation bilinéaire contrainte-déformation, identique en traction et en compression. La branche plastique peut avoir une pente (module de durcissement) ou non.

La relation contrainte-déformation est automatiquement générée à partir de trois paramètres : le module d'Young (partie élastique), la contrainte d'élasticité / de déformation pour la traction uniaxiale et, en option le module de durcissement (pente de la branche plastique).

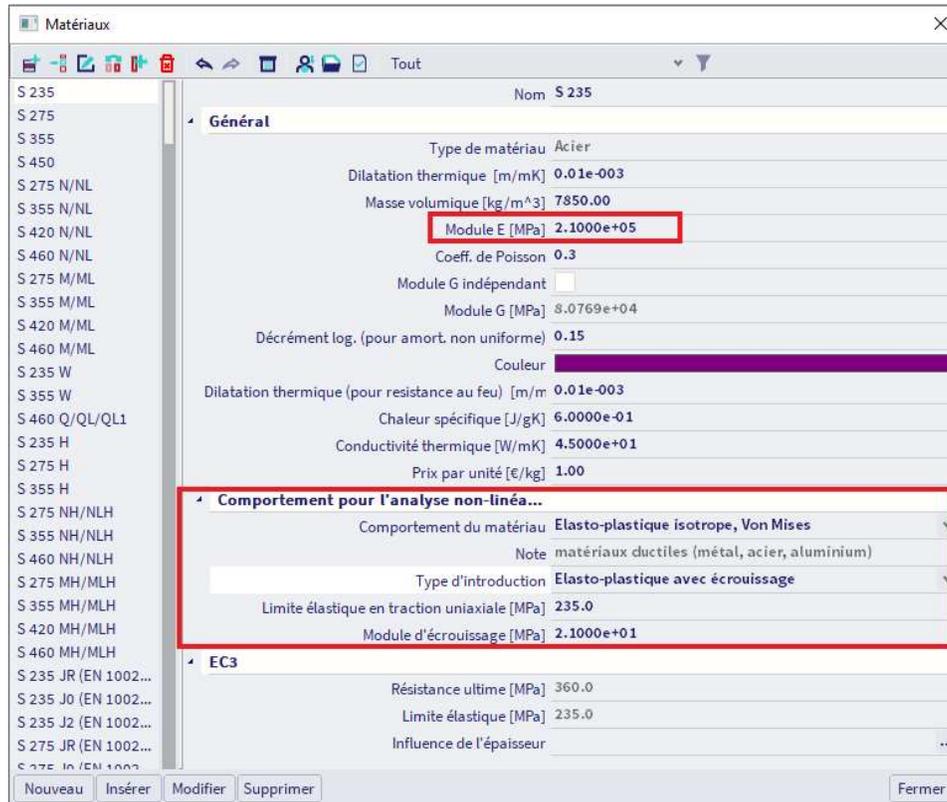


Seule la partie en traction du diagramme est définie, puisque liée à la condition plastique de l'état général de contraintes 3D dans les directions de contraintes principales. Certains modèles de plastification permettent une contrainte de d'élasticité / de déformation différente en compression, qui est définie séparément. Il n'y a pas de valeur de déformation limite (ultime) pour l'analyse.

Lorsque la valeur de déformation réelle dans la structure dépasse le diagramme défini, le diagramme est alors extrapolé, en prenant la tangente du dernier segment défini de la relation contrainte-déformation. La raison de cela est que l'analyse serait défaillante et il serait impossible de trouver où le problème se situe dans la structure. Il est donc préférable de continuer l'analyse et de vérifier les valeurs de déformation obtenues après l'analyse.



Les paramètres suivants définissent le comportement non linéaire du matériau dans la bibliothèque :



- « Module E » : il s'agit du module d'Young du matériau, qui définit la pente de la partie élastique du diagramme contrainte-déformation.
- « Comportement du matériau » : le type de comportement du matériau pour l'analyse non linéaire a doit être sélectionné :
 - o « Élastique »
 - o « Élasto-plastique isotrope, Tresca »
 - o « Élasto-plastique isotrope, Von Mises »
 - o « Élasto-plastique isotrope, Drucker-Prager »
 - o « Élasto-plastique isotrope, Mohr-Coulomb »
- « Type d'introduction » : définition de la branche plastique du diagramme contrainte-déformation :
 - o « Élasto-plastique » : dans le domaine plastique, la contrainte reste constante lorsque la déformation augmente.
 - o « Élasto-plastique avec écrouissage » : dans le domaine plastique, la contrainte augmente avec la déformation.
- « Limite élastique » : limite élastique pour la plastification due au cisaillement.
- « Module d'écrouissage » : pente de la branche plastique du diagramme contrainte-déformation.

Note : des types variés de non linéarité peuvent être combinés dans le même projet. Par contre, il n'est pas possible de cumuler plusieurs types de non linéarité sur le même élément 2D. La propriété « Modèle non linéaire MEF » se comportera comme suit, lorsque combinée avec un matériau plastique :

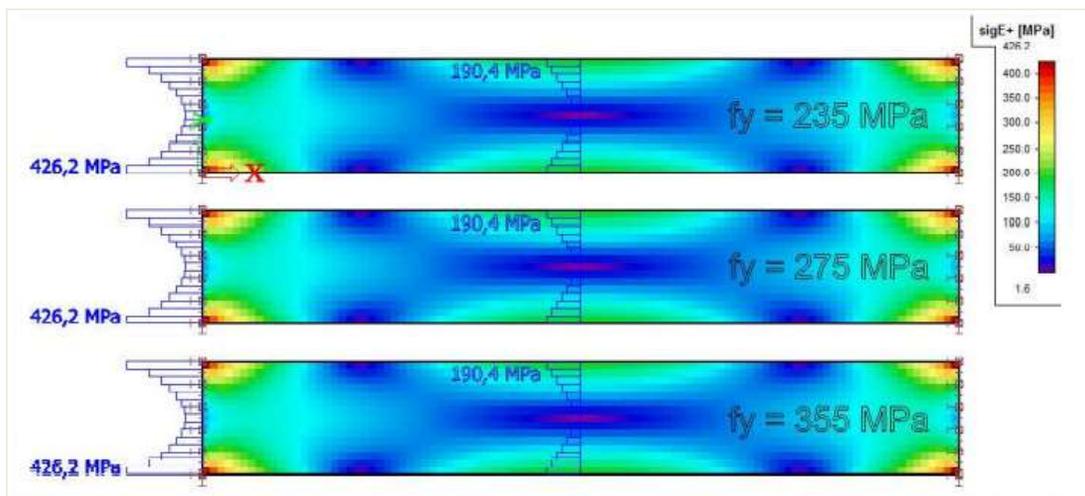
- Matériau plastique et comportement « compression seule 2D » : le comportement « compression seule » sera ignoré et l'élément 2D se comportera de manière plastique.
- Matériau plastique et comportement en « membrane » : le comportement plastique sera ignoré et l'élément 2D se comportera comme une membrane élastique.

Au lancement de l'analyse, un avertissement s'affichera donnant la même information sur les conflits de fonctionnalités.

Exemple : Plastic_Plate_Stresses.esa

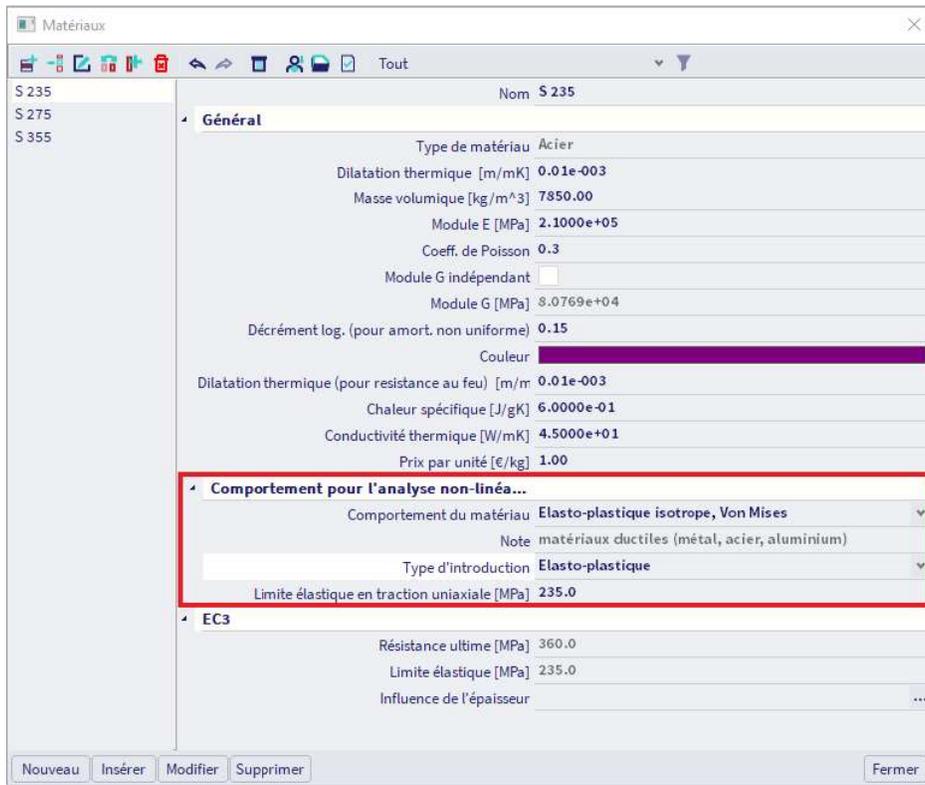
Dans ce projet, trois murs verticaux de différents matériaux sont chargés avec la même charge surfacique verticale de $242,90\text{kN/m}^2$. La valeur de la charge est assez élevée pour être sûr que les contraintes de Von Mises dans chacun des murs soient plus grandes que la limite élastique f_y autorisée pour les matériaux.

L'analyse linéaire montre les résultats suivants pour les contraintes de Von Mises :

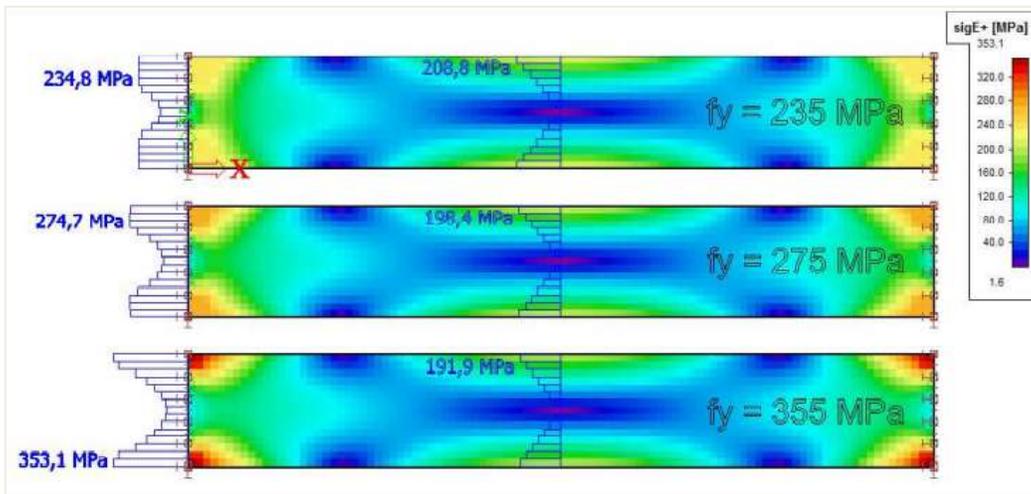


Comme attendu, les contraintes de Von Mises pour chaque voile sont exactement les mêmes et sont supérieures à la limite élastique f_y .

Pour chaque matériau utilisé, les propriétés suivantes pour l'analyse non linéaire sont insérées :



L'analyse non linéaire montre les résultats suivants pour les contraintes de Von Mises :



Chapitre 10: Contrôle ELS

10.1. Déplacements nodaux

Les déplacements aux nœuds définissent les flèches globales maximales dans les directions verticales et horizontales.

Les valeurs suivantes sont contrôlées dans l'exemple ci-dessous :

- Limite pour les flèches horizontales : $\delta = h/150$
- Limite pour les flèches verticales : $\delta_{\max} = h/200$

Exemple : Industrial Hall.esa

Regardons les « Résultats » / « Déplacements de nœud » et la combinaison « CO2 – SLS ».

- Déformation horizontale :

Le déplacement maximal dans la direction X est 25,2mm sur une hauteur de 6,9m.
Et dans la direction Y, 27,3mm sur une hauteur de 8,1m.

Limite pour la flèche horizontale : $\delta = h/150$

$$\begin{aligned} 6900 / 150 &= 46 \text{ mm} & \Rightarrow 25,2\text{mm} < 46\text{mm} & \Rightarrow \text{OK} \\ 8100 / 150 &= 54 \text{ mm} & \Rightarrow 27,3\text{mm} < 54\text{mm} & \Rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Déformation verticale :

Le déplacement maximal dans la direction Z est 57,0mm.

Limite pour la flèche verticale : $\delta = h/200$

$$30000 / 200 = 150 \text{ mm} \Rightarrow 57,0\text{mm} < 150\text{mm} \Rightarrow \text{OK}$$

- Dans SCIA Engineer :

Déplacement des noeuds								
Calcul linéaire Combinaison: CO2 Extrême: Global Sélection: Tout								
Nom	Cas	U _x [mm]	U _y [mm]	U _z [mm]	Φ _x [mrad]	Φ _y [mrad]	Φ _z [mrad]	U _{total} [mm]
N113	CO2/1	-25.2	-0.5	-0.1	-1.3	0.3	0.0	25.2
N114	CO2/2	25.2	-0.5	-0.1	-1.3	-0.3	0.0	25.2
N70	CO2/3	0.0	-27.3	0.0	1.5	0.0	1.2	27.3
N60	CO2/4	0.0	27.3	0.0	-1.5	0.0	1.2	27.3
N109	CO2/5	12.6	0.1	-57.0	-0.1	-0.3	0.0	58.4
N82	CO2/6	9.9	-8.6	13.6	-24.8	-0.2	1.7	18.9
N80	CO2/6	9.6	-9.6	0.0	-27.5	0.0	1.2	13.6
N179	CO2/7	-9.6	9.6	0.0	27.5	0.0	1.2	13.6
N116	CO2/8	-9.2	-0.1	-20.9	-0.4	-5.7	0.0	22.9
N112	CO2/5	9.2	-0.1	-20.9	-0.4	5.7	0.0	22.9
N95	CO2/7	-9.6	-9.0	0.0	-26.0	0.0	-4.0	13.2
N87	CO2/6	9.6	-9.0	0.0	-26.0	0.0	4.0	13.2

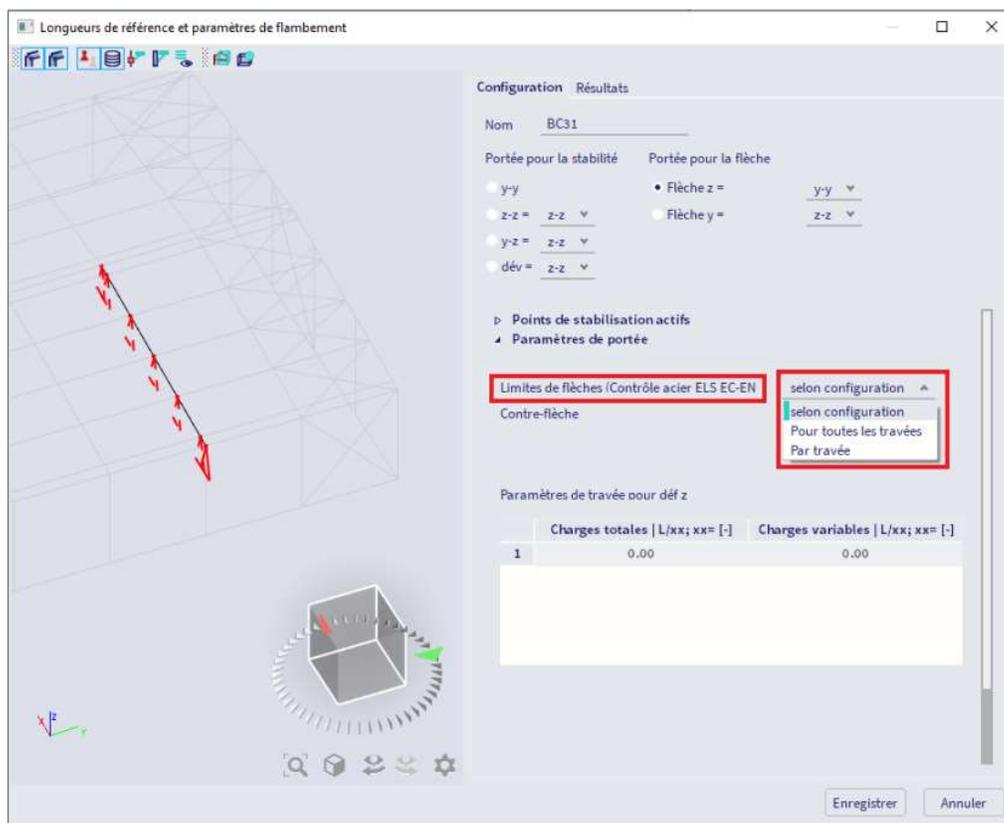
10.2. Déformation relative – Contrôle ELS

Pour effectuer un contrôle ELS, les données suivantes doivent être spécifiées :

- La portée des éléments à calculer ;
- Les limites de flèche des éléments à calculer ;
- La contre-flèche attribuée aux éléments (option).

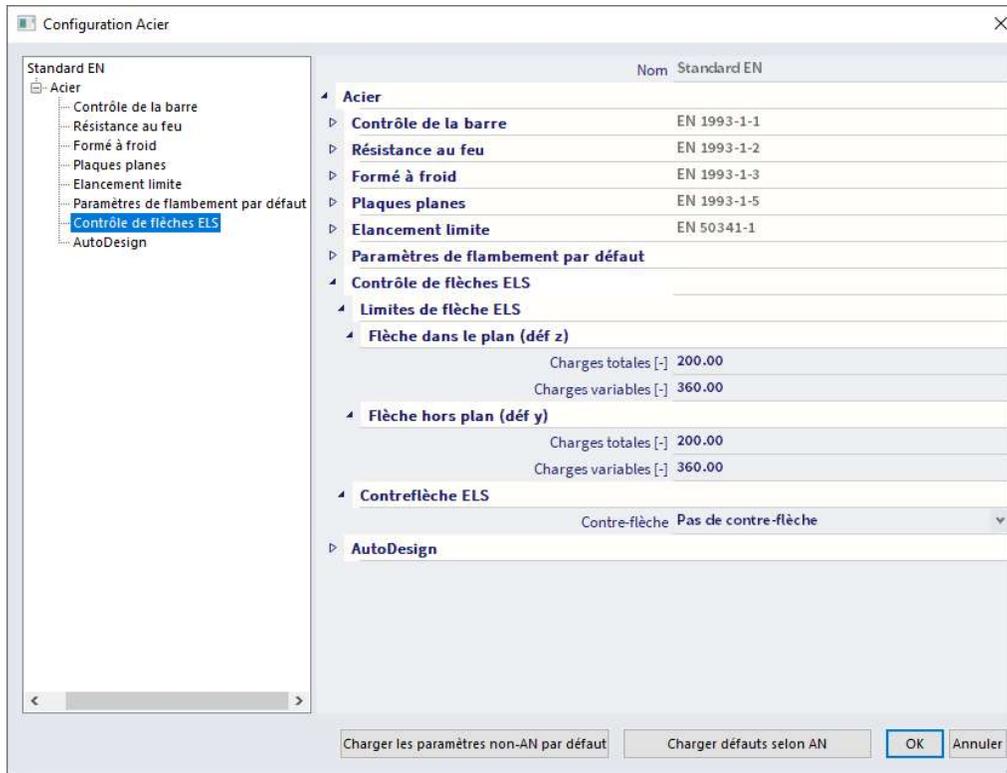
La travée se définit dans la fenêtre des « Longueurs de référence et paramètres de flambement ». Il y est également possible d'outrepasser les limites de flèche et les contre-flèches définies dans la « Configuration Acier » pour certains groupes de flambement.

Les limites de flèches peuvent être définies dans les « Paramètres de portée » de cette boîte de dialogue. Les limites de flèche peuvent être définies indépendamment pour les directions locales y et z (à partir des options de flèches actives def_y et def_z), et indépendamment pour les charges totales et pour les charges variables.

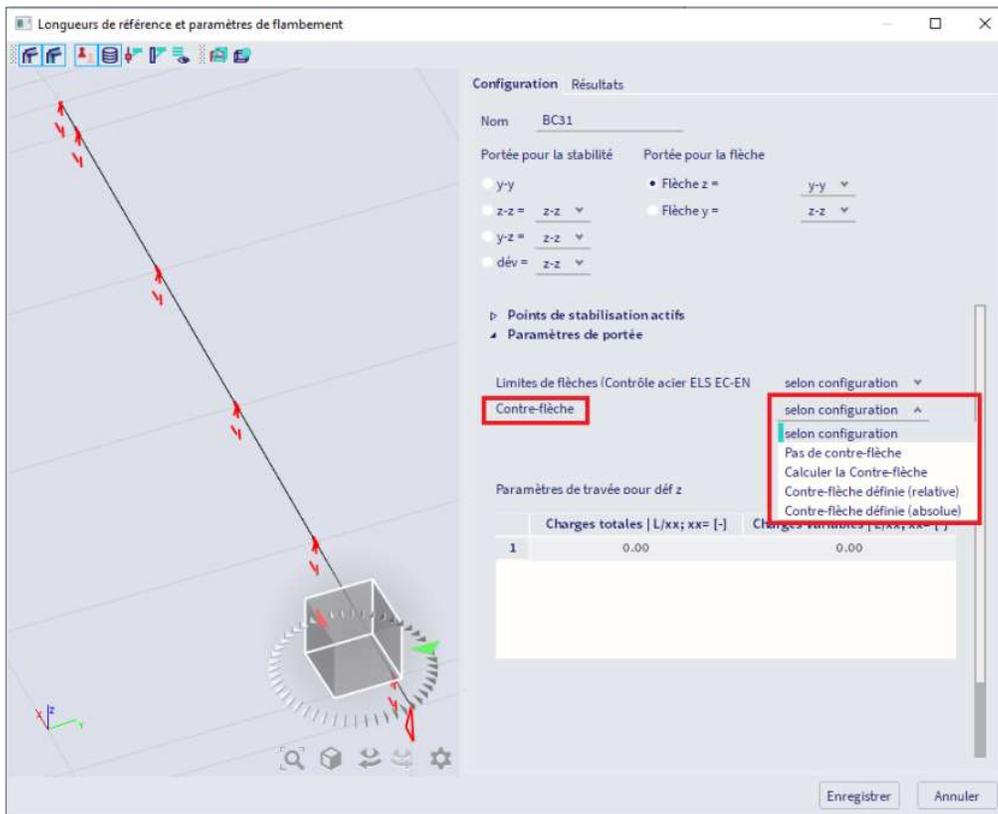


Trois options sont disponibles :

- « Pour toutes les travées » : les mêmes limites de flèche seront appliquées à toutes les travées des éléments sélectionnés.
- « Par travée » : des limites de flèche différentes seront appliquées aux différentes travées.
- « Selon configuration » : les limites de flèche spécifiées dans la « Configuration Acier » (dans le processus « Acier ») seront appliquées à toutes les travées :



La contre-flèche peut être définie indépendamment pour les directions y et z locales (à partir des options de flèche actives, def_y ou def_z) via le menu déroulant :



Cinq options sont disponibles :

- « Pas de contre-flèche » : aucune contre-flèche ne sera appliquée.
- « Calculer la contre-flèche » : la contre-flèche peut être calculée à partir des limites de flèche. Vous pouvez définir certaines conditions limites (forme de la contre-flèche, le minimum, le maximum, la limite et l'arrondi de la contre-flèche). Cette option est disponible depuis SCIA 19.1.
- « Contre-flèche définie (relative) » : la valeur de la contre-flèche sera saisie, travée par travée, en coordonnées relatives (1 / unités de longueur).
- « Contre-flèche définie (absolue) » : la valeur de la contre-flèche sera saisie, travée par travée, en coordonnées absolues (1 / unités de longueur).
- « Selon configuration » : les valeurs de contre-flèche spécifiées dans la « Configuration Acier » seront appliquées à toutes les travées.

Note : La contre-flèche est définie dans le respect de l'axe local z. Si l'axe local z est défini vers le bas, il vous faudra entrer une valeur négative pour avoir une contre-flèche vers le haut.

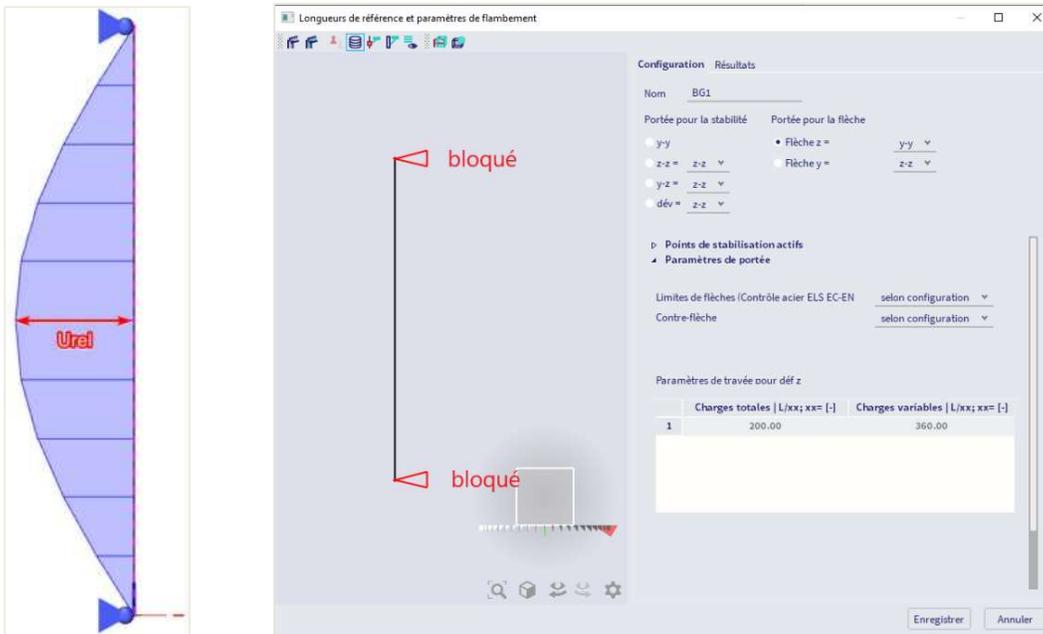
Avec le « Contrôle ELS Acier », dans le processus « Acier », les déformations relatives peuvent être vérifiées. Les déformations relatives sont données en valeurs absolues, en valeurs relatives liées aux travées, ou en unités de contrôle liées aux limites des valeurs relatives des travées.

Il est également possible de visualiser la contre-flèche via le contrôle ELS.

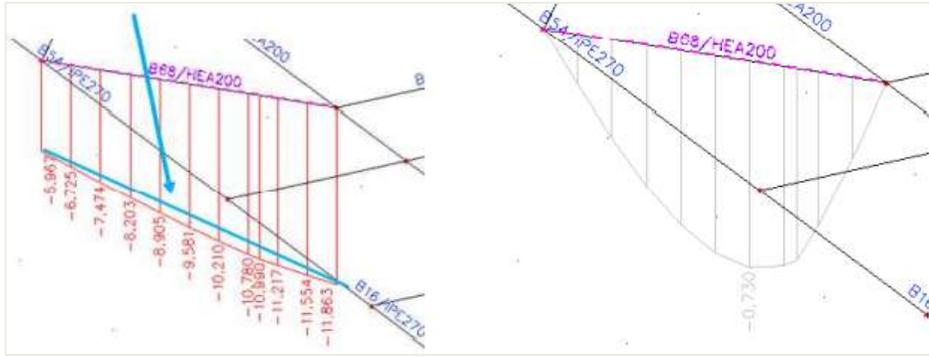
Deux options pour cette travée ci-dessous sont possibles et explicitées :

- **Deux nœuds maintenus** :

Lorsque deux nœuds sont maintenus dans ce menu comme présenté ci-dessous, la déformation est égale à la flèche maximale de la poutre en comparaison avec une ligne connectant les deux nœuds d'extrémités :



Ci-dessous un exemple de ce principe :



Ci-dessous le calcul de cette déformation relative.

La déformation dans le début de la poutre est de 5,967mm et à la fin de la poutre de 11,863mm.

La déformation maximale est de 0,979m depuis le début de la poutre.

Ce point s'est donc déjà déplacé de 9,5mm (cf ligne bleue sur le schéma) :

$$u_{\text{ligne bleue}; 0,979\text{m}} = 5,967\text{mm} + \frac{0,979\text{m}}{1,632\text{m}} * (11,863\text{mm} - 5,967\text{mm}) = 9,504\text{mm}$$

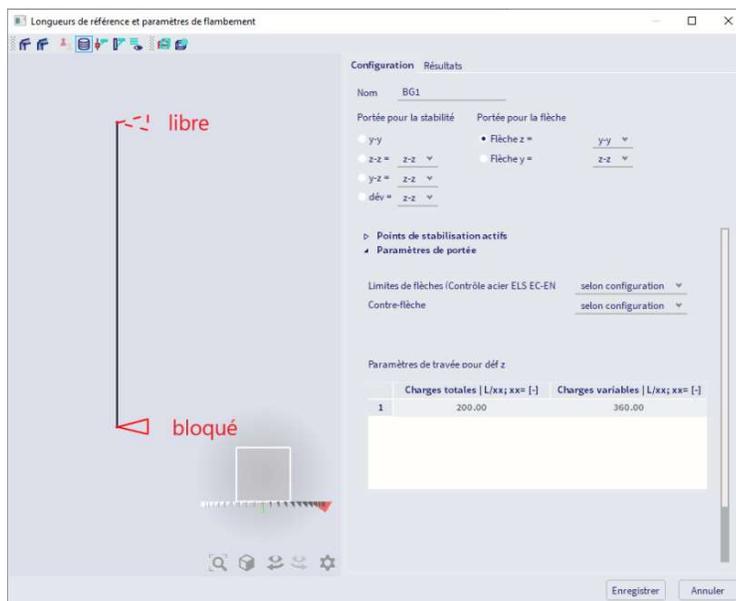
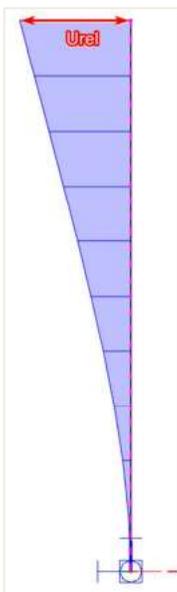
Et $u_{z,\text{relative}} = 10,2\text{mm} - 9,5\text{mm} = 0,7\text{mm}$

Et supposons que la longueur de cette poutre = 1632m :

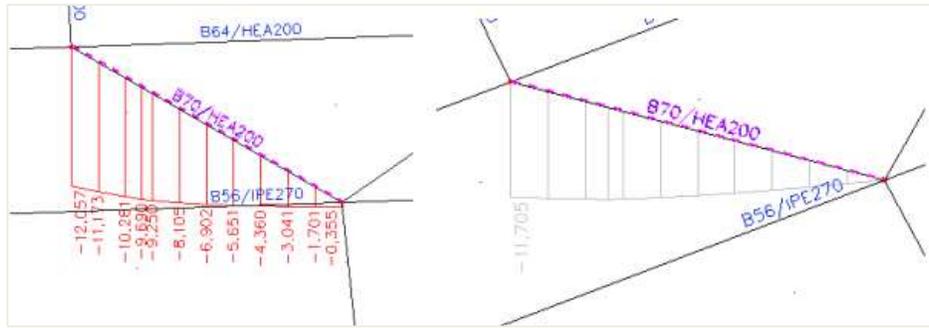
$$\text{rel } u_z = \frac{0,73\text{mm}}{1632\text{mm}} = 1/2236$$

- **Un nœud maintenu et l'autre nœud libre** (par exemple une poutre en porte à faux) :

C'est le cas si l'un des nœuds d'extrémité est libre.



Ci-dessous un exemple de ce principe :



Maintenant la déformation relative maximale est égale à la déformation moins la déformation du nœud bloqué.

Et $u_{z,relative} = 12,057\text{mm} - 0,355\text{mm} = 11,7\text{mm}$

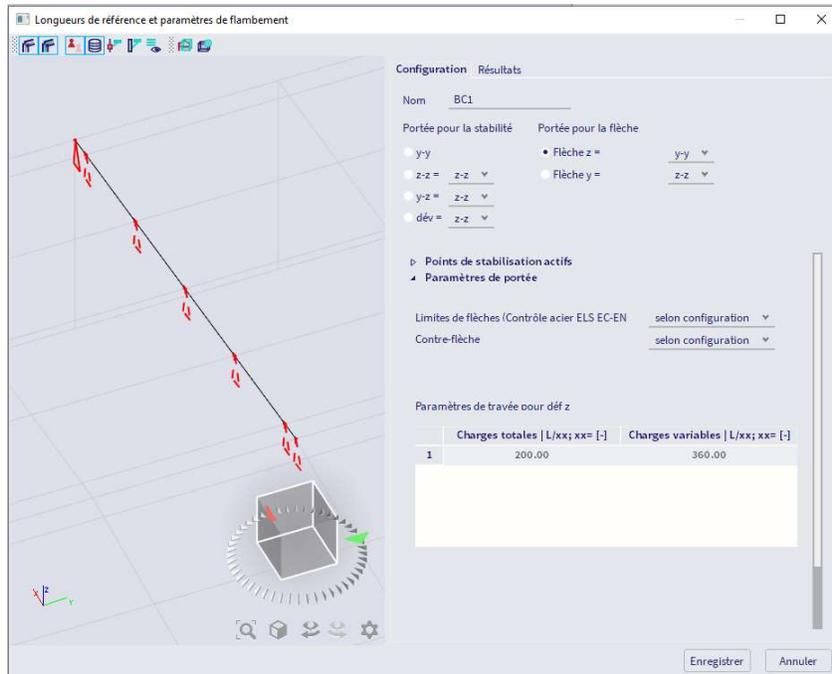
Et supposons que la longueur de cette poutre = 1632m :

$$rel\ uz = \frac{11,7\text{mm}}{1632\text{mm}} = 1/139$$

Ce principe est présenté dans l'exemple du hall industriel ci-après.

Exemple : Industrial Hall.esa

Regardons l'élément poutre B10. Dans la fenêtre des « Longueurs de référence et paramètres de flambement », les limites de flèche sont prises égales à L/200 pour les charges totales et L/360 pour les charges variables, comme cela est défini dans la « Configuration Acier ».



Contrôle acier ELS EC-EN 1993

Calcul linéaire
 Combinaison: CO2
 Système de coordonnées: Principal
 Extrême 1D: Global
 Sélection: B10

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 [-]
B10	14.325-	CO2/1	0.0 12.6	0.0 44.5	17.2 150.7	9.6 83.7	0.00 0.08	0.00 0.53	- -	0.53

Autour de l'axe y-y (dans la direction z), seul le premier nœud a été pris en compte comme appui, la poutre se comporte donc comme un porte à faux et la limite de la flèche sera mise à jour avec un coefficient 2.

Longueur de l'élément = 15,075m

Déformation u_{z,max} = 12,6mm (et 0mm au début de la poutre)

- U_{z,max,relative} = 12,6mm – 0,0mm = 12,6mm
- U_{z,max,relative} / longueur = 12,6mm / 15075mm = 1 / 1196 => contrôle = (1/1196) / (1/100) = 0,08

Déformation u_{z,var} = 44,5mm (et 0mm au début de la poutre)

- U_{z,var,relative} = 44,5mm – 0,0mm = 44,5mm
- U_{z,var,relative} / longueur = 44,5mm / 15075mm = 1 / 339 => contrôle = (1/339) / (1/180) = 0,53

Chapitre 11: Vérification de la résistance au feu

Pour le calcul de la résistance au feu, une édition Professionnelle ou Experte est nécessaire. Le contrôle de la résistance au feu a été ajouté au module esasd.05.xx ou sensd.05xx (par exemple esasd.05.01 ou bien sensd.05.01 pour la norme EC-EN).

11.1. Général

Le contrôle de résistance au feu dans SCIA Engineer a été développé conformément à l'EN 1993-1-2 – modèle de calcul simple.

Pour une courbe de température sélectionnée, la température dans le matériau après une durée imposée est calculée. Et avec cette température du matériau, les caractéristiques du matériau sont mises à jour.

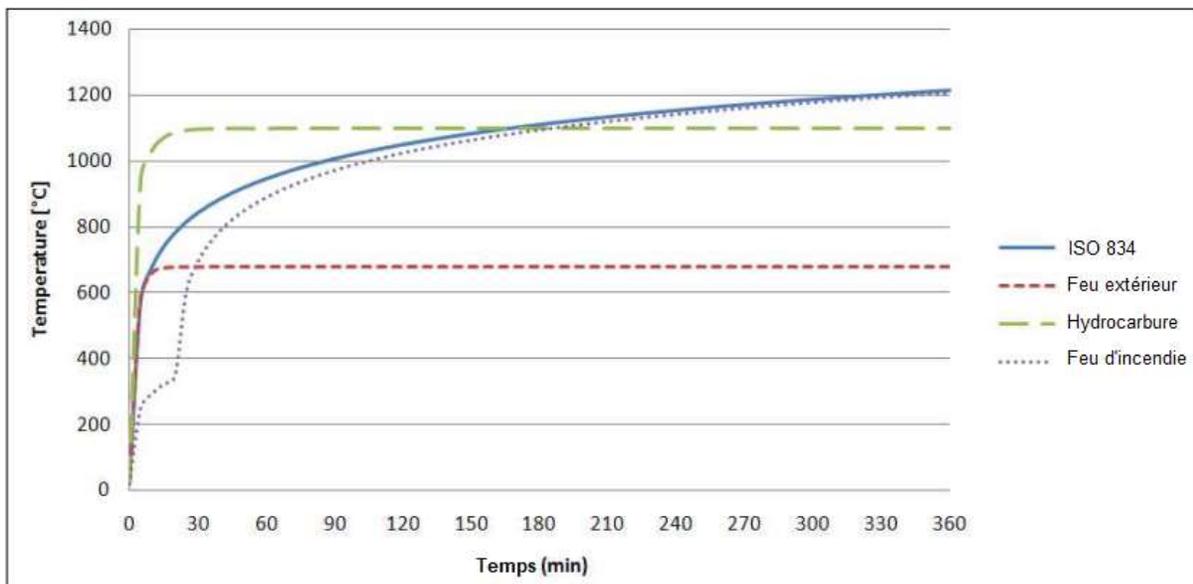
Les niveaux requis de sécurité au feu dépendent de différents facteurs tels que :

- Type d'occupation ;
- Hauteur et taille de la structure ;
- Efficacité de l'action de la brigade au feu ;
- Mesures actives comme les ouvertures et les arroseurs.

11.1.1. Courbes de température-temps

C'est la température de l'air dans le temps.

Vous pouvez choisir entre 4 courbes nominales température-temps dans SCIA Engineer :



Courbe standard ISO 834 :

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) [^{\circ}\text{C}]$$

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Courbe de feu extérieur :

$$\theta_g = 660 * (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313 \cdot e^{-3,8t}) + 20 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Courbe d'hydrocarbure :

$$\theta_g = 1080 * (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20 [^{\circ}\text{C}]$$

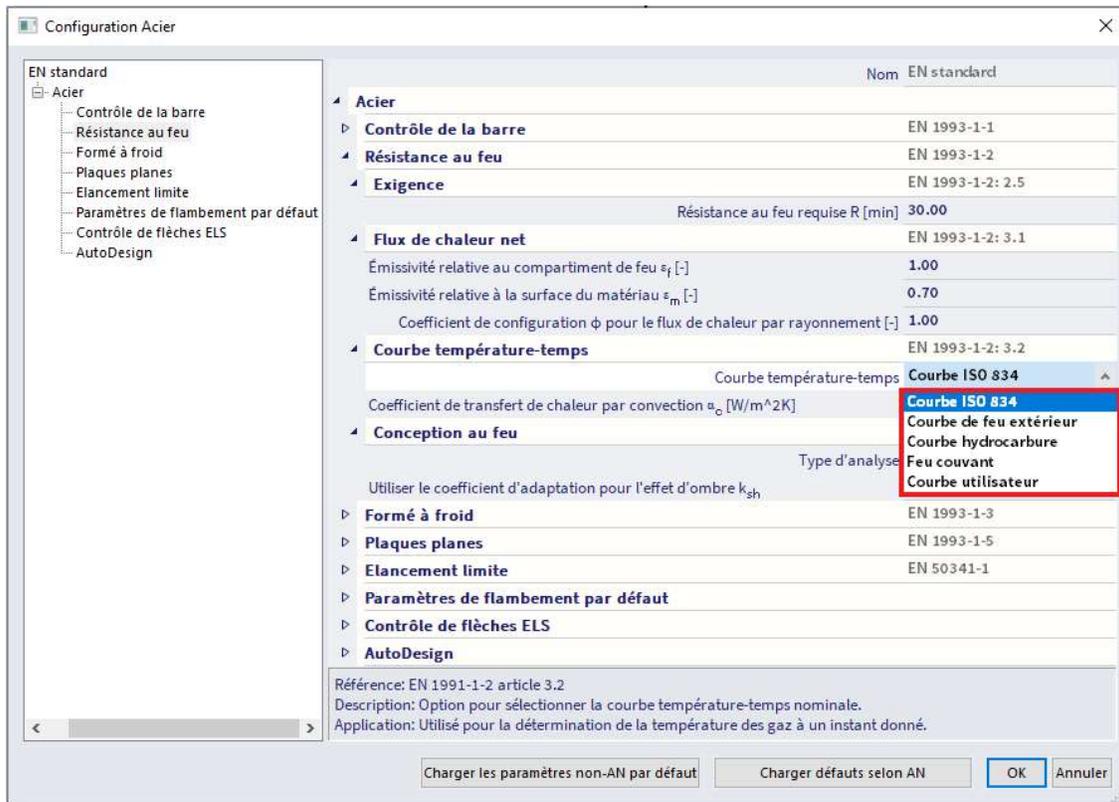
$$\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Courbe de feu d'incendie :

$$\theta_g = 154 \cdot \sqrt[4]{t} + 20 [^{\circ}\text{C}]$$

Après 20 minutes suivi par la courbe standard ISO 834.

La courbe de température-temps peut être choisie dans le processus « Acier » et « Configuration Acier » :



11.1.2. Température de l'acier

Ensuite, la température de l'acier sera calculé après un certain temps avec les formules suivantes. Cette température d'acier sera prise avec l'hypothèse d'une température uniforme dans la section entière :

Elément non protégé :

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{A_m/V}{c_a\rho_a} * h_{net}\Delta t$$

Elément protégé :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p/V}{d_p c_a \rho_a} * \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{\left(1 + \frac{\phi}{3}\right)} \Delta t - \left(e^{\phi/10} - 1\right) \Delta\theta_{g,t}$$

Avec :

k_{sh} : coefficient de correction pour les effets d'ombres :

$$k_{sh} = 0,9 * \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V} \quad \text{pour les sections en I sous actions nominales du feu}$$

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V} \quad \text{pour tous les autres cas}$$

A_m / V : coefficient de section pour les éléments non protégés [1/m]

Dans le tableau 4.2 (EN 1993-1-2), quelques coefficients de section sont calculés pour des éléments en acier non protégés.

$[A_m / V]_b$: valeur du coefficient de section

h_{net} : valeur de calcul du flux de chaleur par unité de section [W/m²]

Cette valeur devrait être obtenue de l'EN 1991-1-2 avec $\varepsilon_f = 1,0$ et $\varepsilon_m = 0,7$.

ϕ :

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p * \frac{A_p}{V}$$

A_p / V : coefficient de section, cf aussi le tableau 4.3 de l'EN 1993-1-2.

Et le flux de chaleur net peut se calculer conformément à l'EN 1991-1-2 article 3.1 :

$$h_{net} = h_{net,r} + h_{net,c}$$

Avec :

$h_{net,c}$: flux de transfert par convection [W/m²]

$$h_{net,c} = \alpha_c * (\theta_g - \theta_m)$$

$h_{net,r}$: flux de transfert par radiation [W/m²]

$$h_{net,r} = \phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

Et :

α_c : coefficient du flux de transfert par convection [W/m²K]

θ_g : température du gaz autour de l'élément exposé au feu [°C]

Cette température peut être adoptée comme température nominale dans les courbes de température – temps comme donné ci-après.

θ_m : température à la surface de l'élément [°C]

σ : constante de Stephan Boltzmann (= $5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

ε_m : émissivité surfacique du feu = 0,7 (EN 1993-1-2)

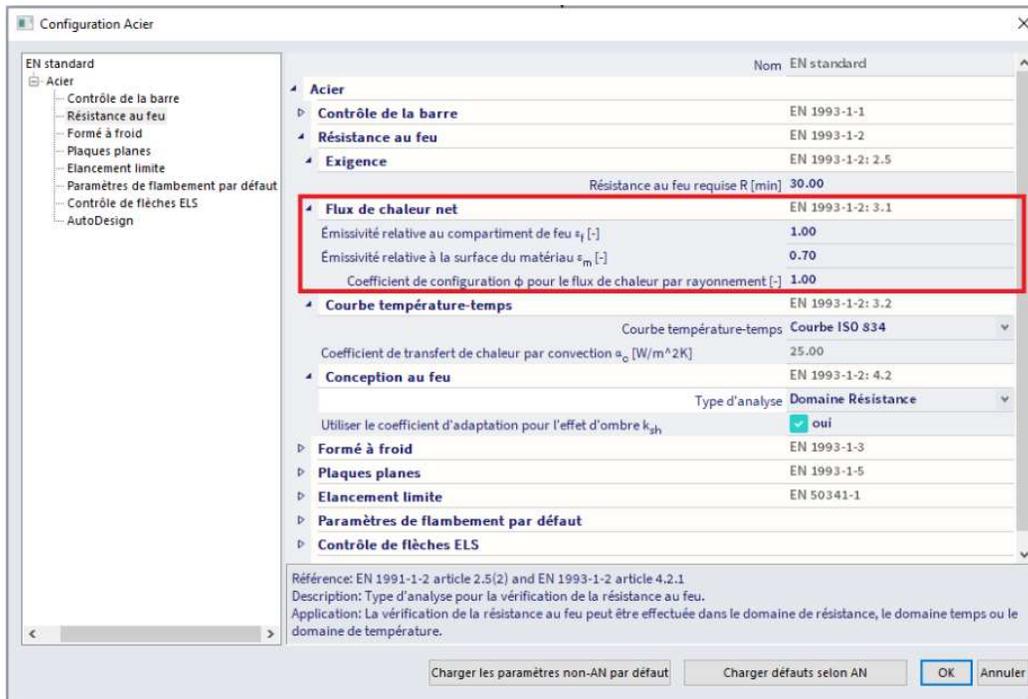
ε_f : émissivité du feu = 1

ϕ : coefficient de configuration = 1,0. Une valeur plus petite peut être choisie pour prendre en compte la position et les effets d'ombre (le calcul est donné dans l'EN 1991-1-2 - Annexe G).

θ_r : température de radiation effective de l'environnement du feu [°C]

En cas d'éléments totalement en feu, cette température de radiation peut être représenté par la température du gaz θ_g autour de cet élément.

Les paramètres des formules ci-dessus peuvent être adaptés dans la « Configuration Acier » :



11.1.3. Propriétés de l'acier

La plupart des propriétés de l'acier seront modifiées avec une température différente, donc une fois que la température est connue, les propriétés de l'acier peuvent être calculées. Ci-dessous les propriétés de l'acier au carbone de l'EN 1993-1-2, art.3 sont utilisés. Les propriétés pour l'acier inoxydable peuvent se trouver dans l'EN 1993-1-2 Annexe C. Il y a aussi les coefficients de réduction pour les sections de classe 4 conformément au tableau E.1 de l'EN 1993-1-2 Annexe E.

❖ Coefficients de réduction

Limite d'élasticité effective, liée à la limite d'élasticité à 20°C :

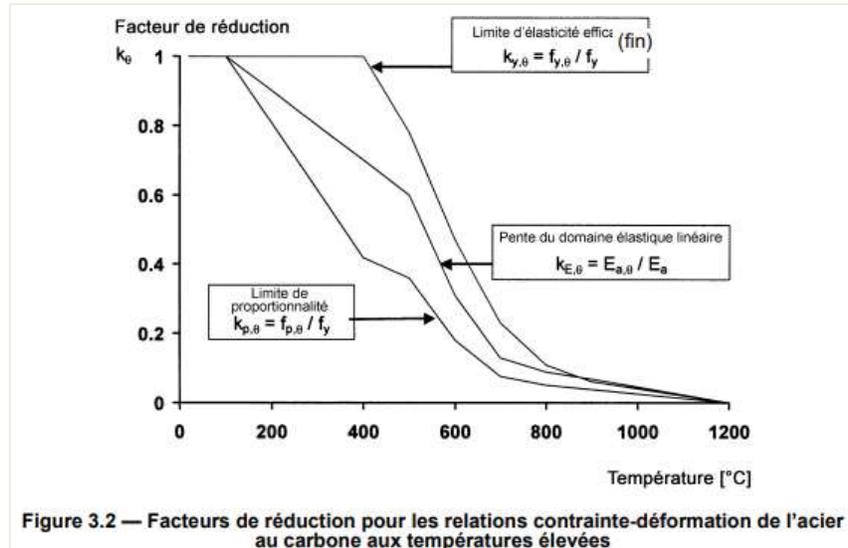
$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$$

Limite proportionnelle, liée à la limite d'élasticité à 20°C :

$$k_{P,\theta} = \frac{f_{P,\theta}}{f_y}$$

Pente de la partie linéaire élastique, liée à la pente à 20°C :

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$$

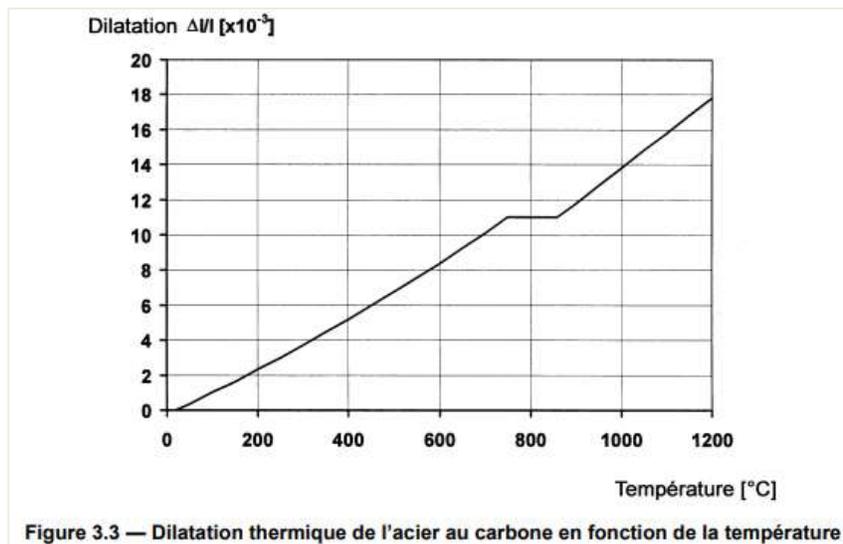


❖ **Dilatation thermique**

La dilatation thermique relative de l'acier $\Delta l/l$ est déterminée par les expressions suivantes :

$$\frac{\Delta l}{l} = (1,2 * 10^{-5} * \theta_a) + (0,4 * 10^{-8} * \theta_a^2) - (2,416 * 10^{-4}) \quad \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = (1,1 * 10^{-2}) \quad \text{pour } 750^\circ\text{C} \leq \theta_a < 860^\circ\text{C}$$



❖ Chaleur spécifique

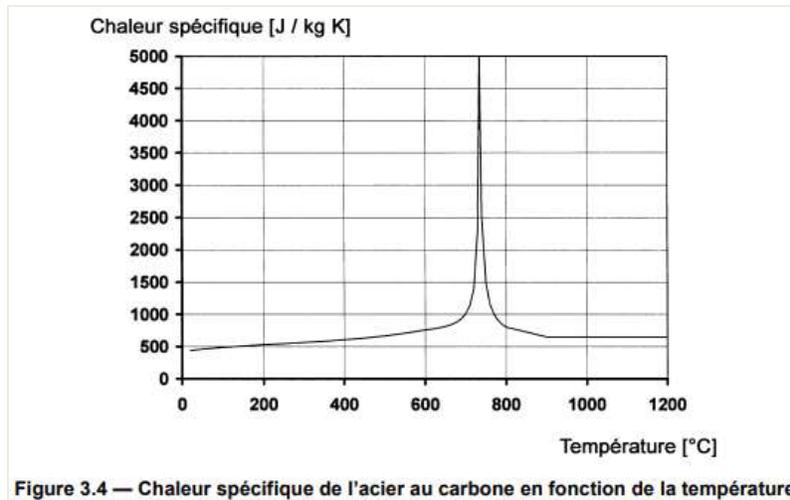
La chaleur spécifique c_a [J/kgK] est déterminée par les expressions suivantes :

$$c_a = 425 + (7,73 * 10^{-1} * \theta_a) - (1,69 * 10^{-3} * \theta_a^2) + (2,22 * 10^{-6} * \theta_a^3) \text{ J/kgK} \quad \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK} \quad \text{pour } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK} \quad \text{pour } 735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$$

$$c_a = 650 \text{ J/kgK} \quad \text{pour } 900^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C}$$

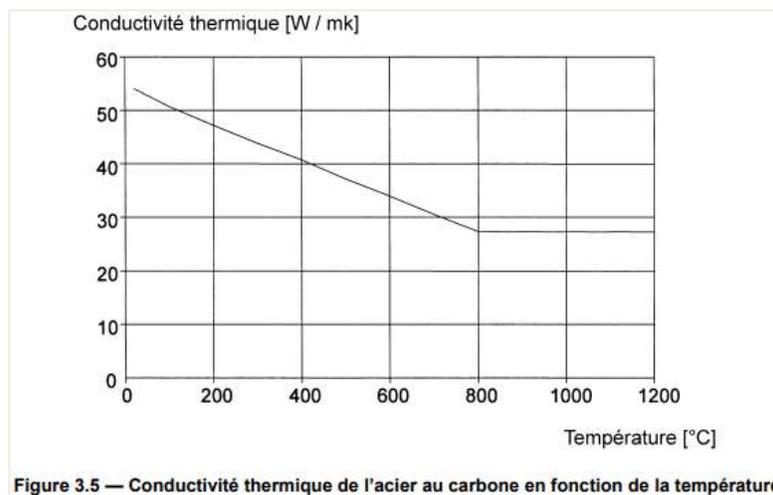


❖ Conductivité thermique

La conductivité thermique λ_a [W/mK] est déterminée par les expressions suivantes :

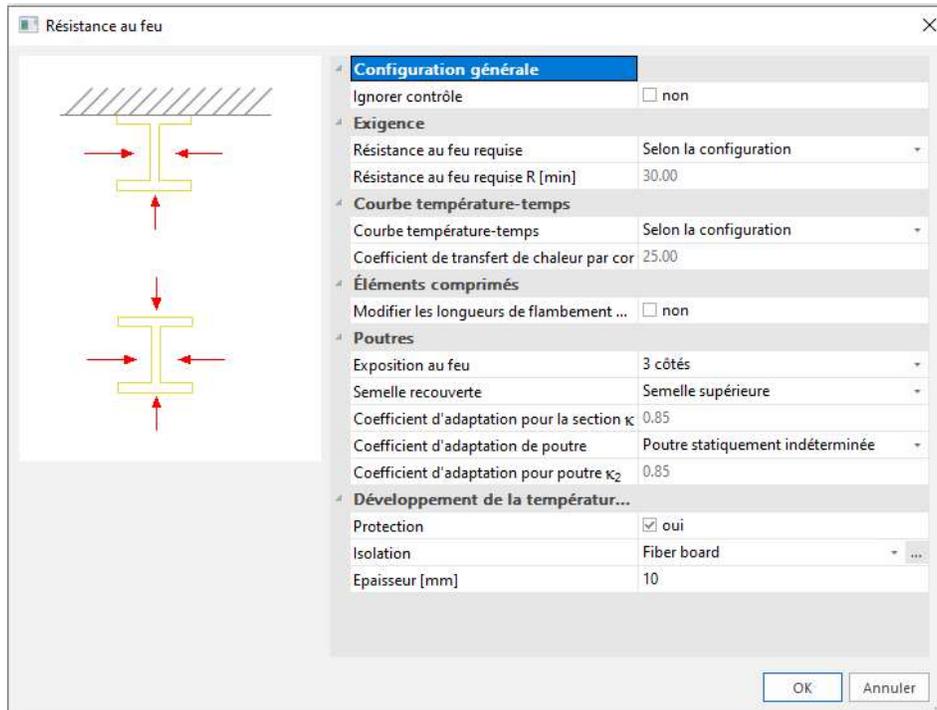
$$\lambda_a = 54 - (3,33 * 10^{-2} * \theta_a) \text{ W/mK} \quad \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_a = 27,3 \text{ W/mK} \quad \text{pour } 800^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C}$$



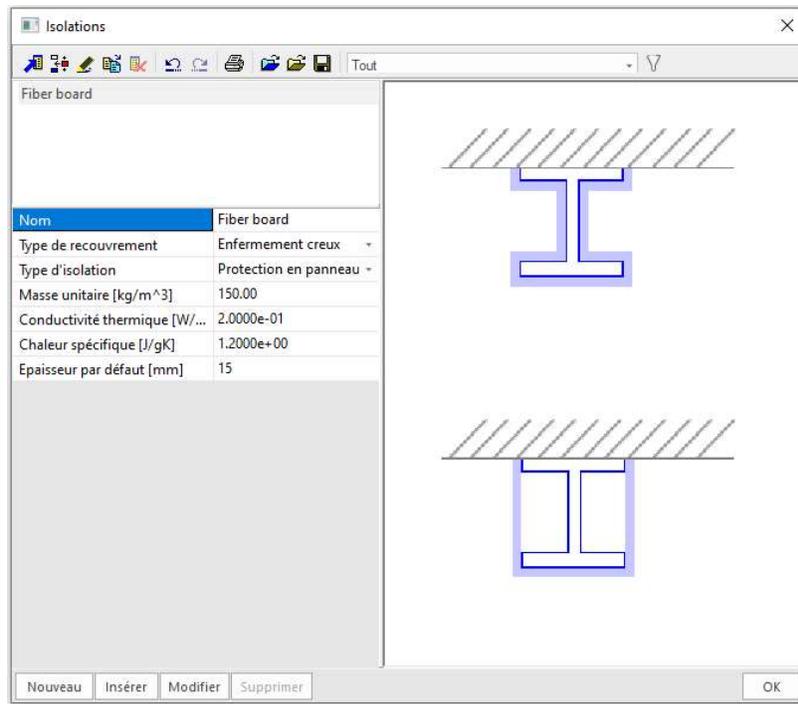
11.1.4. Propriétés de résistance au feu dans SCIA Engineer

Dans SCIA Engineer, vous pouvez saisir les propriétés de résistance au feu sur un élément en acier dans « Acier » / « Barres » / « Données de contrôle d'élément » / « Résistance au feu » :



Avec :

- « Résistance au feu requise » : saisie par l'utilisateur ou bien selon la configuration.
- « Résistance au feu requise R » : saisie de la résistance requise (en minutes).
- « Courbe température-temps » : selon la configuration ou à dépasser pour l'élément sélectionné.
- « Coefficient de transfert de chaleur par convection α_c » : peut être modifié uniquement lorsque la courbe température-temps est « personnalisé ».
- « Modifier les longueurs de flambement en situation de feu » : les coefficients de flambement peuvent être saisis manuellement pour le contrôle de résistance au feu.
- « Exposition au feu » : la section sera exposée au feu sur tous les côtés ou seulement trois côtés.
- « Semelle recouverte » : lorsqu'une section est exposée au feu sur trois côtés seulement, les semelles couvertes peuvent être choisies ici.
- « Coefficient d'adaptation pour la section k_1 » : ce paramètre est le coefficient d'adaptation pour une distribution de température non uniforme le long d'une section. Ce coefficient k_1 est utilisé pour le contrôle de la résistance du moment de calcul $M_{fi,\theta,Rd}$.
- « Coefficient d'adaptation de poutre » : aux appuis d'une poutre statiquement indéterminée ou tous les autres cas.
- « Coefficient d'adaptation pour poutre k_2 » : ce paramètre est le coefficient d'adaptation pour une distribution de température non uniforme le long de la poutre. Ce coefficient k_2 est utilisé pour le contrôle de la résistance du moment de calcul $M_{fi,\theta,Rd}$.
- « Protection » : oui ou non.
- « Isolation » : ici la protection d'isolation peut être saisie :



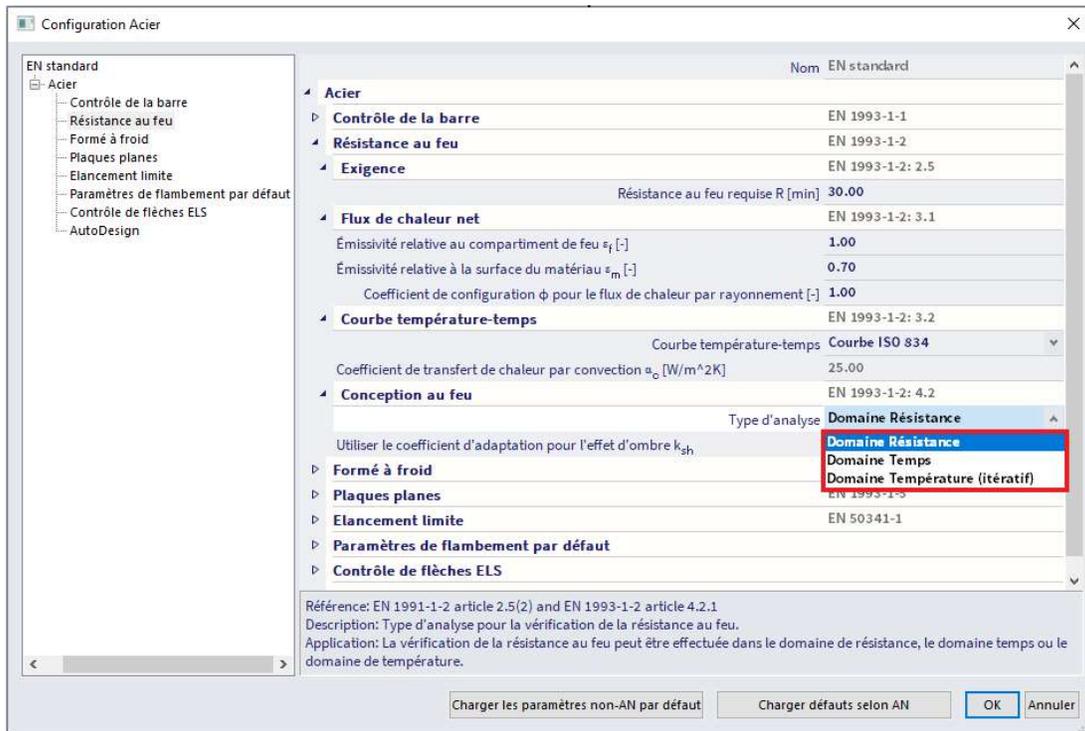
- « Epaisseur » : épaisseur de l'isolation (en mm).

11.2. Méthodes de calcul

Dans SCIA Engineer, trois méthodes de calcul sont implémentées :

- Domaine Résistance
- Domaine Temps
- Domaine Température (itératif)

Le choix entre ces types d'analyse peut se faire dans le processus « Acier », dans « Configuration Acier » :



11.2.1. Domaine de résistance

Principe

Il vous faudra choisir la courbe de température-temps utilisée et saisir une durée de résistance au feu souhaitée. Après cela, la température du gaz puis de l'acier seront calculées.

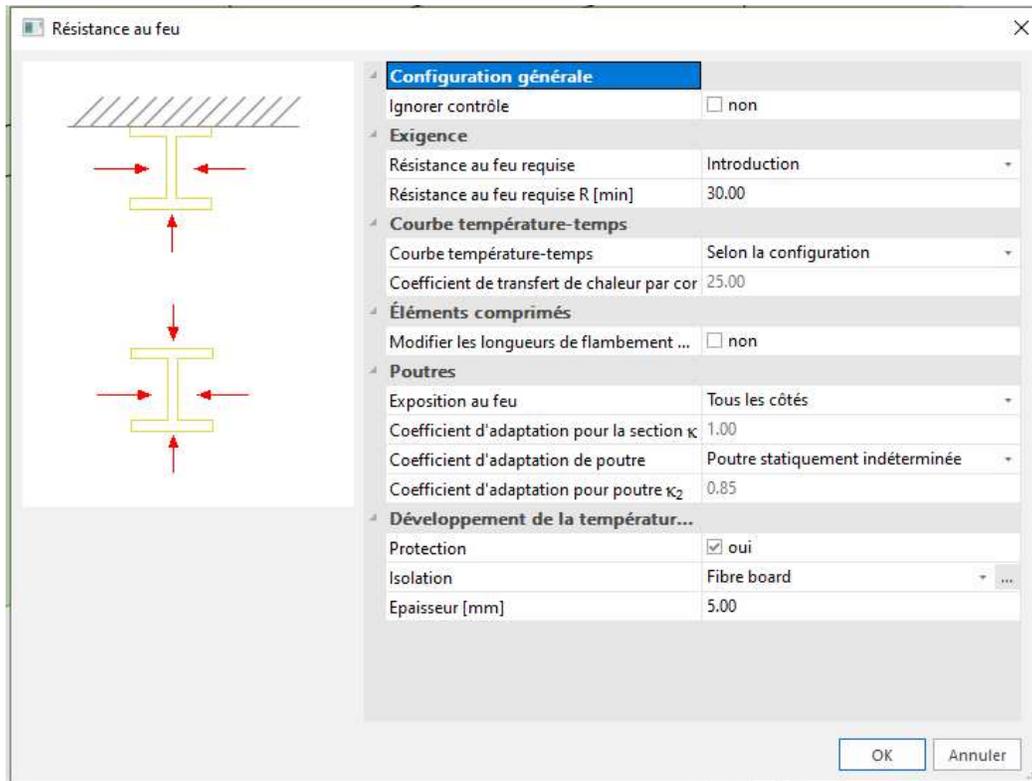
Avec cette température de l'acier, les propriétés réduites seront calculées et un contrôle de résistance au feu selon l'EN 1993-1-2, art. 4, sera effectué avec ces propriétés d'acier adaptées. Ce contrôle aboutira à un contrôle unité, qui est le contrôle de résistance au feu pour le domaine de résistance.

Exemple dans SCIA Engineer

Ce principe est expliqué à travers un exemple dans SCIA Engineer.

Exemple : Industrial Hall.esa

Regardons l'élément poteau B28.
 Les propriétés de résistance au feu suivantes sont saisies :



La résistance au feu sera donc contrôlée après 30 minutes (= 1800 secondes) avec une protection en panneau de fibre et les coefficients de flambement sont pris égaux aux coefficients de flambement du contrôle d'acier normal.

Le contrôle de résistance au feu est effectué via le service « Acier » / « Barres » / « Contrôle ELU » / Contrôle acier au feu EC-EN 1993, pour ce poteau et pour la classe de résultats « Feu » (qui contient les combinaisons EN accidentelles avec les coefficients ψ_1 et les combinaisons EN accidentelles avec les coefficients ψ_2). Il en découle un contrôle unité de 1,45.

Lorsque l'on regarde la sortie détaillée, ce calcul est donné par SCIA Engineer (il est également possible d'afficher les formules comme pour les contrôles normaux).

D'abord, les coefficients partiels de sécurité sont donnés :

Coeff. partiels de sécurité	
γ_{M0} pour la résistance des sections	1.00
γ_{M1} pour la résistance en stabilité	1.00
γ_{M2} pour la résistance en section nette	1.25
$\gamma_{M,f}$ pour la résistance au feu	1.00

Puis les propriétés du matériau (non adaptées par la température) sont données :

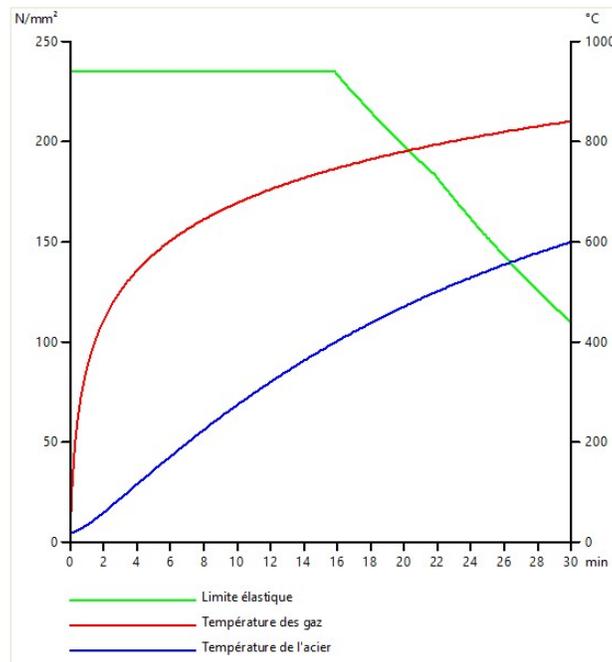
Matériau			
Limite élastique	f_y	235.0	MPa
Limite de rupture	f_u	360.0	MPa
Fabrication		Laminé	

Et les propriétés de résistance au feu sont saisies dans SCIA Engineer. Ici est également indiqué que le contrôle de résistance au feu a été effectué après 30 minutes de feu.

Résistance au feu			
Courbe température-temps		Courbe ISO 834	
Coeff. de transfert thermique par convection	α_c	25.00	W/m ² K
Emissivité relative au compartiment de feu	ϵ_f	1.00	
Emissivité relative au matériau de surface	ϵ_m	0.70	
Coef. de configuration pour flux de chaleur par rayonnement	φ	1.00	
Résistance au feu requise	R	30.00	min
Température des gaz	θ_g	841.80	°C
Température du matériau	$\theta_{a,t}$	600.58	°C
Exposition de poutre		Tous les côtés	
Coefficient d'adaptation de section	κ_1	1.00	
Coefficient d'adaptation de poutre	κ_2	0.85	
Coefficient de réduction pour la limite d'élasticité	$k_{y,\theta}$	0.47	
Coefficient de réduction pour la résistance de contrôle à 0.2%	$k_{0,2p,\theta}$	0.30	
Coefficient de réduction pour le module d'élasticité E	$k_{E,\theta}$	0.31	

Propriétés d'isolation			
Nom		Fibre board	
Type de recouvrement		Enfermement creux	
Type d'isolation		Panneau	
Epaisseur	d_p	5.00	mm
Masse volumique	ρ_p	150.0	kg/m ³
Conductivité thermique	λ_p	2.0000e-01	W/mK
Chaleur spécifique	c_p	1.2000e+00	J/gK
Coefficient de section pour les éléments en acier isolés	A_p/V	1.0857e-01	1/mm

Puis un diagramme est présenté avec la température des gaz (dans cette exemple suivant la courbe ISO 834), la température de l'acier calculée avec une protection, et la réduction de la limite élastique.



Et enfin les contrôles unité sont présentés avec les propriétés réduites :

....:CONTRÔLE EN SECTION:....

La position du contrôle critique est 6.900 m

Efforts internes		Calculé	Unité
Effort normal	$N_{fi,Ed}$	-61.02	kN
Effort tranchant	$V_{y,fi,Ed}$	-0.01	kN
Effort tranchant	$V_{z,fi,Ed}$	-35.04	kN
Torsion	$T_{fi,Ed}$	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{y,fi,Ed}$	-241.75	kNm
Moment de flexion	$M_{z,fi,Ed}$	-0.05	kNm

Classification pour le contrôle en section

Classification selon EN 1993-1-2 article 4.2.2

Classification des parties internes et libres selon EN 1993-1-1 Tableau 5.2 page 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	Ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Limite classe 1 [-]	Limite de Classe 2 [-]	Limite de Classe 3 [-]	Classe
1	SO	108.90	17.00	56843.908	56947.278	1.0	0.4	1.0	6.4	7.6	8.5	11.7	1
3	SO	108.90	17.00	56799.105	56695.735	1.0	0.4	1.0	6.4	7.6	8.5	11.7	1
4	I	685.00	13.20	53109.643	-46601.210	-0.9		0.5	51.9	59.2	68.2	93.8	1
5	SO	108.90	17.00	-50335.476	-50438.846								
7	SO	108.90	17.00	-50290.672	-50187.302								

La section est classée en Classe 1

Contrôle compression

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 et formule (4.5)

Aire de la section	A	1.8753e+04	mm ²
Résistance de calcul au flambement	$N_{fi,t,Rd}$	2065.15	kN
Contrôle unité		0.03	-

Contrôle du moment de flexion pour M_y

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 et formule (4.10)

Module de section plastique	$W_{pl,y}$	5.1115e+06	mm ³
Moment de flexion plastique	$M_{pl,y,Rd}$	1201.21	kNm
Résistance à la flexion	$M_{y,fi,\theta,Rd}$	562.89	kNm
Résistance de calcul à la flexion	$M_{y,fi,t,Rd}$	662.22	kNm
Contrôle unité		0.37	-

Contrôle du moment de flexion pour M_z

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 et formule (4.10)

Module de section plastique	$W_{pl,z}$	6.3087e+05	mm ³
Moment de flexion plastique	$M_{pl,z,Rd}$	148.25	kNm
Résistance à la flexion	$M_{z,fi,\theta,Rd}$	69.47	kNm
Résistance de calcul à la flexion	$M_{z,fi,t,Rd}$	81.73	kNm
Contrôle unité		0.00	-

Contrôle à l'effort tranchant pour V_y

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 et formule (4.16)

Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Aire de cisaillement	A_v	9.4086e+03	mm ²
Résistance plastique à l'effort tranchant pour V_y	$V_{pl,y,Rd}$	1276.54	kN
Résistance plastique à l'effort tranchant pour V_y	$V_{y,fi,t,Rd}$	598.19	kN
Contrôle unité		0.00	-

Contrôle à l'effort tranchant pour V_z

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.3 et formule (4.16)

Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Aire de cisaillement	A_v	1.1389e+04	mm ²
Résistance plastique à l'effort tranchant pour V_z	$V_{pl,z,Rd}$	1545.22	kN
Résistance plastique à l'effort tranchant pour V_z	$V_{z,fi,t,Rd}$	724.09	kN
Contrôle unité		0.05	-

Contrôle combiné flexion, effort normal et effort tranchant

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.9.1 et formule (6.41)

Moment plastique	$M_{y,f,t,Rd}$	662.22	kNm
Exposant pour le ratio de flexion y	α	2.00	
Moment plastique	$M_{z,f,t,Rd}$	81.73	kNm
Exposant pour le ratio de flexion z	β	1.00	

Contrôle unité (4.9) = 0.13 + 0.00 = 0.13 -

Note: Les efforts tranchants sont inférieurs à la moitié de la résistance plastique à l'effort tranchant.

Par conséquent, leur influence sur les moments résistants est négligée.

Note: Puisque l'effort normal satisfait les deux critères (6.33) et (6.34) de l'EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) son effet sur le moment résistant selon l'axe y-y est négligé.

Note: Puisque l'effort normal satisfait le critère (6.35) de l'EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) son effet sur le moment résistant selon l'axe z-z est négligé.

L'élément satisfait le contrôle en section.

....:CONTRÔLE DE STABILITÉ:....

Classification pour le contrôle de stabilité

Position déterminante pour la classification pour la stabilité : 0.000 m

Classification selon EN 1993-1-2 article 4.2.2

Classification des parties internes et libres selon EN 1993-1-1 Tableau 5.2 page 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Limite classe 1 [-]	Limite de Classe 2 [-]	Limite de Classe 3 [-]	Classe
1	SO	108.90	17.00	3785.673	3785.673	1.0	0.4	1.0	6.4	7.6	8.5	11.9	1
3	SO	108.90	17.00	3785.673	3785.673	1.0	0.4	1.0	6.4	7.6	8.5	11.9	1
4	I	685.00	13.20	3785.673	3785.673	1.0	4.0	1.0	51.9	28.0	32.3	35.7	4
5	SO	108.90	17.00	3785.673	3785.673	1.0	0.4	1.0	6.4	7.6	8.5	11.9	1
7	SO	108.90	17.00	3785.673	3785.673	1.0	0.4	1.0	6.4	7.6	8.5	11.9	1

La section est classée en Classe 4

Note: The stability classification is based on the maximum section classification along the member.

Section efficace N-

Calcul de largeur efficace

Selon EN 1993-1-5 article 4.4

Id	Type	b_D [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_D [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	108.90	235000.000	235000.000	1.0	0.4	0.3	1.0	108.90		
3	SO	108.90	235000.000	235000.000	1.0	0.4	0.3	1.0	108.90		
4	I	685.00	235000.000	235000.000	1.0	4.0	0.9	0.8	569.22	284.61	284.61
5	SO	108.90	235000.000	235000.000	1.0	0.4	0.3	1.0	108.90		
7	SO	108.90	235000.000	235000.000	1.0	0.4	0.3	1.0	108.90		

Section efficace My-

Calcul de largeur efficace

Selon EN 1993-1-5 article 4.4

Id	Type	b_D [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_D [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	108.90	235000.000	235000.000	1.0	0.4	0.3	1.0	108.90		
3	SO	108.90	235000.000	235000.000	1.0	0.4	0.3	1.0	108.90		
4	I	685.00	218716.033	-218716.033	-1.0	23.9	0.4	1.0	342.50	137.00	205.50
5	SO	108.90	-235000.000	-235000.000							
7	SO	108.90	-235000.000	-235000.000							

Section efficace Mz-

Calcul de largeur efficace

Selon EN 1993-1-5 article 4.4

Id	Type	b_D [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	λ_D [-]	ρ [-]	b_e [mm]	b_{e1} [mm]	b_{e2} [mm]
1	SO	108.90	235000.000	41856.604	0.2	0.5	0.3	1.0	108.90		
3	SO	108.90	-41856.604	-235000.000							
4	I	685.00	0.000	0.000							
5	SO	108.90	-41856.604	-235000.000							
7	SO	108.90	235000.000	41856.604	0.2	0.5	0.3	1.0	108.90		

Propriétés effectives						
Aire effective	A_{eff}	1.7222e+04	mm ²			
Moment d'inertie effectif de la section	$I_{eff,y}$	1.6608e+09	mm ⁴	$I_{eff,z}$	5.2895e+07	mm ⁴
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.4111e+06	mm ³	$W_{eff,z}$	3.9920e+05	mm ³
Décalage du centre de gravité	$e_{n,y}$	0.00	mm	$e_{n,z}$	0.00	mm

Contrôle flambement flexionnel

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 & Annexe E et formule (4.5)

Paramètres de flambement		yy	zz	
Noeuds déplaçables		déplaçable	non-déplaçable	
Longueur système	L	6.900	6.900	m
Coefficient de flambement	k	3.51	0.99	
Longueur de flambement	l_{cr}	24.239	6.800	m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	5860.39	2370.88	kN
Elancement	λ	81.44	128.04	
Elancement relatif	λ_{rel}	0.83	1.31	
Elancement relatif	$\lambda_{rel,\theta}$	0.82	1.29	
Imperfection	α	0.65	0.65	
Coefficient de réduction	χ_{fi}	0.54	0.34	
Résistance au flambement	$N_{b,fi,t,Rd}$	659.23	414.11	kN

Vérification du flambement flexionnel			
Aire efficace de la section	A_{eff}	1.7222e+04	mm ²
Résistance au flambement	$N_{b,fi,t,Rd}$	414.11	kN
Contrôle unité		0.15	-

Contrôle de flambement torsionnel (-flexionnel)

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.2 & Annexe E et formule (4.5)

Note: La résistance au flambement torsionnel (-flexionnel) de cette section en I est supérieure à sa résistance au flambement flexionnel. Par conséquent, les résultats pour le flambement torsionnel (-flexionnel) ne sont pas présentés.

Contrôle de déversement

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.4 & Annexe E et formule (4.19)

Paramètres de déversement			
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.4111e+06	mm ³
Moment critique élastique	M_{cr}	1784.30	kNm
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	0.76	
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT,\theta}$	0.75	
Imperfection	α_{LT}	0.65	
Coefficient de réduction	$\chi_{LT,fi}$	0.58	
Résistance de calcul au flambement	$M_{b,fi,t,Rd}$	179.85	kNm
Contrôle unité		1.34	-

Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	l_{LT}	6.900	m
Infl. pos. des charges		pas d'influence	
Coefficient de correction	k	1.00	
Coefficient de correction	k_w	1.00	
Coefficient de moment de déversement	C_1	1.77	
Coefficient de moment de déversement	C_2	0.00	
Coefficient de moment de déversement	C_3	1.00	
Distance au centre de cisaillement	d_z	0.00	mm
Distance du point d'application de la charge	z_g	0.00	mm
Constante de mono-symétrie	β_y	0.00	mm
Constante de mono-symétrie	z_j	0.00	mm

Note: Les paramètres C sont déterminés selon l'ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Contrôle en flexion composée avec compression

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.5 & Annexe E et formule (4.21c),(4.21d)

Paramètres de contrôle en flexion composée avec compression			
Aire efficace de la section	A_{eff}	1.7222e+04	mm ²
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.4111e+06	mm ³
Module de section efficace	$W_{eff,z}$	3.9920e+05	mm ³
Force de compression de calcul	$N_{fi,Ed}$	61.02	kN
Moment de flexion de calcul	$M_{y,fi,Ed}$	-241.75	kNm
Moment de flexion de calcul	$M_{z,fi,Ed}$	-0.05	kNm
Coefficient de réduction	$\chi_{min,fi}$	0.34	
Coefficient de réduction	$\chi_{z,fi}$	0.34	
Coefficient de réduction	$\chi_{LT,fi}$	0.58	
Coef. de moment équivalent	$\beta_{M,y}$	1.80	
Coefficient	μ_y	-0.06	
Coefficient d'interaction	k_y	1.01	
Coef. de moment équivalent	$\beta_{M,z}$	1.80	
Coefficient	μ_z	-0.09	
Coefficient d'interaction	k_z	1.01	
Coef. de moment équivalent	$\beta_{M,LT}$	1.80	
Coefficient	μ_{LT}	0.20	
Coefficient d'interaction	k_{LT}	0.97	

Contrôle unité (4.21c) = 0.15 + 0.78 + 0.00 = 0.93 -

Contrôle unité (4.21d) = 0.15 + 1.31 + 0.00 = **1.45** -

Contrôle du voilement

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3

Selon EN 1993-1-5 article 5 & 7.1 et formule (5.10) & (7.1)

Paramètres de voilement			
Longueur du panneau d'âme	a	6.900	m
âme		non raidie	
Montant d'extrémité		non rigide	
Hauteur d'âme	h_w	719.00	mm
Épaisseur d'âme	t	13.20	mm
Limite élastique	f_{yw}	235.0	MPa
Largeur de semelle	b_f	265.00	mm
Épaisseur de semelle	t_f	17.00	mm
Limite élastique	f_{yf}	235.0	MPa
Coefficient de matériau	ϵ	0.85	
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	

Vérification du voilement			
Elancement âme	h_w/t	54.47	
Elancement limite de l'âme		51.00	
Elancement de plaque	$\lambda_{w,\theta}$	0.62	
Coefficient de réduction	$\chi_{w,fi}$	1.20	
Contribution de l'âme	$V_{b,w,fi,t,Rd}$	462.03	kN
Capacité de la semelle	$M_{f,fi,t,Rd}$	210.53	kNm
Coefficient de semelle	c	0.000	m
Contribution de la semelle	$V_{b,f,fi,t,Rd}$	0.00	kN
Résistance maximale	$V_{b,fi,t,Rd,limit}$	462.03	kN
Résistance	$V_{b,fi,t,Rd}$	462.03	kN
Résistance plastique	$M_{pl,fi,t,Rd}$	562.89	kNm
Ratio d'effort tranchant	$\eta_{\geq,bar}$	0.08	

Contrôle unité (5.10) = 0.08 -

Note: La vérification de l'interaction entre la flexion et le voilement peut être négligée car le ratio de cisaillement ne dépasse pas 0.5.

Cet élément ne satisfait PAS le contrôle de stabilité !

Donc dans cet exemple, le contrôle en flexion composée avec compression donne un contrôle unité de 1,45.

Pour atteindre la résistance au feu requise de 30 minutes, vous pouvez augmenter l'épaisseur de l'isolation (par exemple à 10mm).

11.2.2. Domaine Temps

Principe

Il vous faudra choisir la courbe de température-temps utilisée et saisir une durée de résistance au feu souhaitée. Après cela, la température du gaz puis de l'acier seront calculées.

La température critique de l'acier sera également calculée. Le contrôle de la résistance au feu conformément au domaine temps sera le ratio de la température réelle de l'acier après une durée choisie et la température critique de l'acier.

La température critique de l'acier $\theta_{a,cr}$ sera calculée avec une formule simple :

$$\theta_{a,cr} = 39,19 * \ln \left[\frac{1}{0,9674 * \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$$

Où μ_0 est le taux d'utilisation, c'est-à-dire le contrôle unité conformément à l'EN 1993-1-2 au temps = 0 sec, donc sans augmentation de la température.

Note : cette simple formule n'est valable que si aucun phénomène de stabilité ou critère de déformation n'a été pris en compte ! Cette méthode de calcul sera donc rarement utilisée.

Exemple dans SCIA Engineer

Ce principe est expliqué à travers un exemple dans SCIA Engineer.

Exemple : Industrial Hall.esa

Regardons l'élément poteau B28.

Modifier dans la Configuration Acier le type d'analyse en « Domaine Temps ».

Le contrôle de résistance au feu est effectué via le service « Acier » / « Barres » / « Contrôle ELU » / Contrôle acier au feu EC-EN 1993, pour ce poteau et pour la classe de résultats « Feu ». Il en découle un contrôle unité de 1,00.

Lorsque l'on regarde la sortie détaillée, l'information suivante est mentionnée dans SCIA Engineer :

Les résultats de contrôle ci-après sont donnés au temps $t = 0.00$ min. Ces résultats ont été utilisés pour déterminer le taux d'utilisation à la température critique.

Le contrôle conformément à l'EN 1993-1-2 sera alors effectué à $t = 0$ min, donc à 20°C, sans réduction de propriétés acier. Ce contrôle entrainera un faible contrôle unité, qui est le taux d'utilisation μ_0 .

Dans cet exemple, le contrôle en flexion composée avec compression donne également le plus grand contrôle unité de $0,45 = \mu_0$.

Contrôle en flexion composée avec compression

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.5 & Annexe E et formule (4.21c),(4.21d)

Paramètres de contrôle en flexion composée avec compression			
Aire efficace de la section	A _{eff}	1.7222e+04	mm ²
Module de section efficace	W _{eff,y}	4.4111e+06	mm ³
Module de section efficace	W _{eff,z}	3.9920e+05	mm ³
Force de compression de calcul	N _{fi,Ed}	61.02	kN
Moment de flexion de calcul	M _{y,fi,Ed}	-241.75	kNm
Moment de flexion de calcul	M _{z,fi,Ed}	-0.05	kNm
Coefficient de réduction	χ _{min,fi}	0.34	
Coefficient de réduction	χ _{z,fi}	0.34	
Coefficient de réduction	χ _{LT,fi}	0.57	
Coef. de moment équivalent	β _{M,y}	1.80	
Coefficient	μ _y	-0.08	
Coefficient d'interaction	k _y	1.00	
Coef. de moment équivalent	β _{M,z}	1.80	
Coefficient	μ _z	-0.11	
Coefficient d'interaction	k _z	1.00	
Coef. de moment équivalent	β _{M,LT}	1.80	
Coefficient	μ _{LT}	0.20	
Coefficient d'interaction	k _{LT}	0.99	

Contrôle unité (4.21c) = 0.04 + 0.23 + 0.00 = 0.28 -

Contrôle unité (4.21d) = 0.04 + 0.40 + 0.00 = 0.45 -

Cette valeur est utilisée dans la formule simplifiée de température critique de l'acier :

$$\theta_{a,cr} = 39,19 * \ln \left[\frac{1}{0,9674 * \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 39,19 * \ln \left[\frac{1}{0,9674 * 0,45^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 601,43^{\circ}\text{C}$$

Et la température de l'acier après 30 minutes est de 600,58°C.

Le contrôle unité est de :

$$\frac{600,58^{\circ}\text{C}}{601,43^{\circ}\text{C}} = 1,00$$

Toutes ces valeurs sont données dans le tableau d'ensemble de l'aperçu du contrôle au feu :

Résistance au feu

Vérification dans le domaine Temps selon EN 1993-1-2 article 4.2.4

Résistance au feu			
Courbe température-temps		Courbe ISO 834	
Coeff. de transfert thermique par convection	α _c	25.00	W/m ² K
Emissivité relative au compartiment de feu	ε _f	1.00	
Emissivité relative au matériau de surface	ε _m	0.70	
Coef. de configuration pour flux de chaleur par rayonnement	φ	1.00	
Résistance au feu requise	R	30.00	min
Température des gaz	θ _g	841.80	°C
Température du matériau	θ _{a,t}	600.58	°C
Degré d'utilisation	μ ₀	0.45	
Température critique du matériau	θ _{a,cr}	602.13	°C
Résistance au feu	t _{cr}	30.13	min
Exposition de poutre		Tous les côtés	
Coefficient d'adaptation de section	κ ₁	1.00	
Coefficient d'adaptation de poutre	κ ₂	0.85	
Coefficient de réduction pour la limite d'élasticité	k _{y,θ}	1.00	
Coefficient de réduction pour la résistance de contrôle à 0.2%	k _{0,zp,θ}	1.00	
Coefficient de réduction pour le module d'élasticité E	k _{E,θ}	1.00	
Contrôle unité		1.00	-

Aussi, la durée de résistance au feu est donnée dans ce tableau : cet élément peut résister au feu pendant 30,13minutes.

Note : comme déjà dit, cette simple formule n'est valable que si aucun phénomène de stabilité ou critère de déformation n'a été pris en compte ! Dans cet exemple, la stabilité entraîne le plus grand contrôle unité et est ainsi pris en compte, donc cette méthode n'est pas correcte et ne devrait pas être utilisée.

11.2.3. Domaine Température (itératif)

Principe

Si cette méthode est utilisée, la température critique de l'acier sera calculée par un processus itératif. Donc tout d'abord, une estimation de cette température critique sera choisie et le contrôle unité sera effectué conformément à l'EN 1993-1-2. Si ce contrôle est inférieur à 1, une température critique supérieure sera appliquée. Si ce contrôle est supérieur à 1, une température critique inférieure sera appliquée. Le contrôle unité est alors recalculé jusqu'au moment où ce contrôle unité donne un résultat pour la température critique d'acier compris entre 0,99 et 1.

C'est une procédure plus précise pour calculer la température critique et cette méthode est également valide si un phénomène de stabilité ou un critère de déformation doit être pris en compte.

Exemple dans SCIA Engineer

Ce principe est expliqué à travers un exemple dans SCIA Engineer.

Exemple : Industrial Hall.esa

Regardons l'élément poteau B28.

Modifier dans la Configuration Acier le type d'analyse en « Domaine Température (itératif) ».

Le contrôle de résistance au feu est effectué via le service « Acier » / « Barres » / « Contrôle ELU » / Contrôle acier au feu EC-EN 1993, pour ce poteau et pour la classe de résultats « Feu ». Il en découle un contrôle unité de 1,11.

Lorsque l'on regarde la sortie détaillée, l'information suivante est mentionnée dans SCIA Engineer :

Les résultats ci-après sont donnés à la température critique $\theta_{a,cr} = 543,16$ °C. Ces résultats ont été utilisés pour déterminer la température critique, c-à-d la température à laquelle le contrôle unité d'approche de 1.00.

Le contrôle conformément à l'EN 1993-1-2 sera alors donné à $\theta_{a,cr} = 543,96$ °C. Cette température est calculée de manière itérative, il en résulte un contrôle unité conformément à l'EN 1993-1-2 égal à 1 :

Contrôle en flexion composée avec compression

Selon EN 1993-1-2 article 4.2.3.5 & Annexe E et formule (4.21c),(4.21d)

Paramètres de contrôle en flexion composée avec compression			
Aire efficace de la section	A_{eff}	1.7222e+04	mm ²
Module de section efficace	$W_{eff,y}$	4.4111e+06	mm ³
Module de section efficace	$W_{eff,z}$	3.9920e+05	mm ³
Force de compression de calcul	$N_{fi,Ed}$	61.02	kN
Moment de flexion de calcul	$M_{y,fi,Ed}$	-241.75	kNm
Moment de flexion de calcul	$M_{z,fi,Ed}$	-0.05	kNm
Coefficient de réduction	$\chi_{min,fi}$	0.36	
Coefficient de réduction	$\chi_{z,fi}$	0.36	
Coefficient de réduction	$\chi_{LT,fi}$	0.59	
Coef. de moment équivalent	$\beta_{M,y}$	1.80	
Coefficient	μ_y	-0.03	
Coefficient d'interaction	k_y	1.00	
Coef. de moment équivalent	$\beta_{M,z}$	1.80	
Coefficient	μ_z	-0.06	
Coefficient d'interaction	k_z	1.01	
Coef. de moment équivalent	$\beta_{M,LT}$	1.80	
Coefficient	μ_{LT}	0.19	
Coefficient d'interaction	k_{LT}	0.98	

Contrôle unité (4.21c) = 0.10 + 0.54 + 0.00 = 0.64 -

Contrôle unité (4.21d) = 0.10 + 0.90 + 0.00 = 1.00 -

Et en effet, le contrôle d'unité le plus haut est égal à 1 pour cette température critique.

Donc pour ce cas, le contrôle unité est de :

$$\frac{600,58^{\circ}\text{C}}{543,16^{\circ}\text{C}} = 1,11$$

Toutes ces valeurs sont données dans le tableau d'ensemble de l'aperçu du contrôle au feu :

Résistance au feu

Vérification dans le domaine de la Température selon EN 1993-1-2 article 4.2.4

Résistance au feu			
Courbe température-temps		Courbe ISO 834	
Coeff. de transfert thermique par convection	α_c	25.00	W/m ² K
Emissivité relative au compartiment de feu	ϵ_f	1.00	
Emissivité relative au matériau de surface	ϵ_m	0.70	
Coef. de configuration pour flux de chaleur par rayonnement	φ	1.00	
Résistance au feu requise	R	30.00	min
Température des gaz	θ_g	841.80	°C
Température du matériau	$\theta_{a,t}$	600.58	°C
Température critique du matériau	$\theta_{a,cr}$	543.16	°C
Résistance au feu	t_{cr}	25.03	min
Exposition de poutre		Tous les côtés	
Coefficient d'adaptation de section	k_1	1.00	
Coefficient d'adaptation de poutre	k_2	0.85	
Coefficient de réduction pour la limite d'élasticité	$k_{y,\theta}$	0.65	
Coefficient de réduction pour la résistance de contrôle à 0.2%	$k_{0,2p,\theta}$	0.43	
Coefficient de réduction pour le module d'élasticité E	$k_{E,\theta}$	0.47	
Contrôle unité		1.11	-

Aussi, la durée de résistance au feu est donnée dans ce tableau : cet élément peut résister au feu pendant 25,03minutes.

Pour atteindre la résistance au feu requise de 30 minutes, vous pouvez augmenter l'épaisseur de l'isolation (par exemple à 10mm).

Chapitre 12: Annexe A – Aires de cisaillement

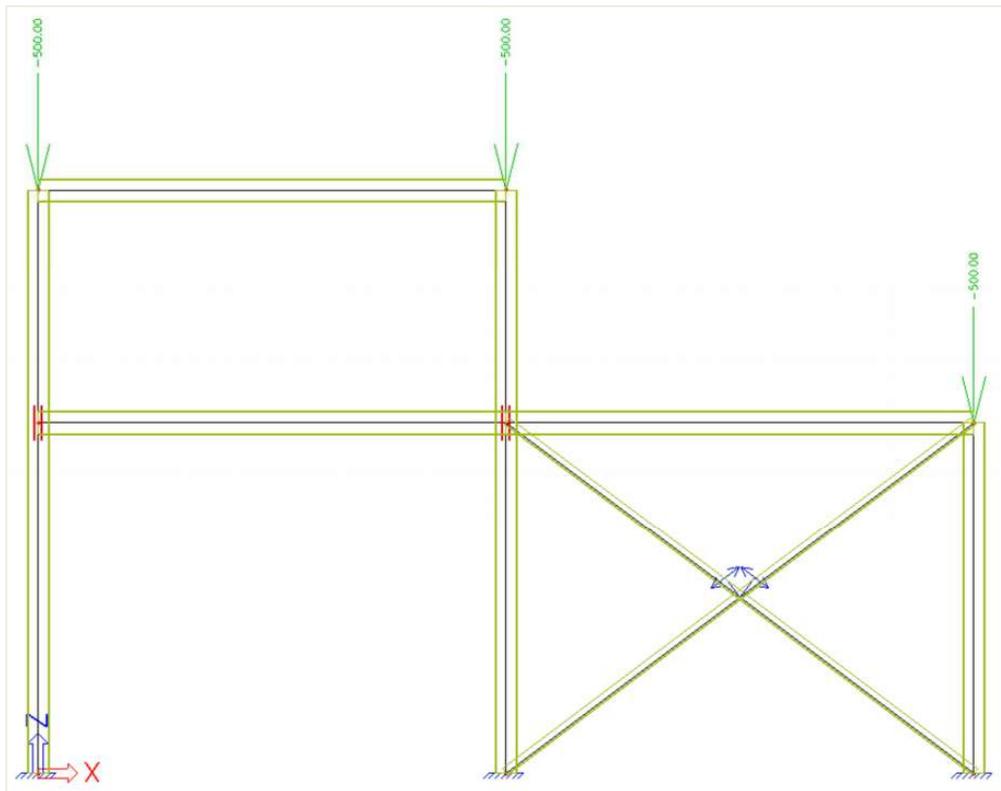
Type de section	Aire de cisaillement	Source
Section en I laminée (FC 1)	$A_{vz} = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2 * r) * t_f \geq \eta * h_w * t_w$ $A_{vy} = 2 * b * t_f + (t_w + r) * t_w$	EN 1993-1-1 ECCS 85
Sections en I asymétriques laminées (FC 101)	$A_{vz} = A - b_t * t_t - b_b * t_b + (t_w + 2 * r) * \left[\frac{(t_b + t_t)}{2} \right] \geq \eta * h_w * t_w$ $A_{vy} = b_t * t_t + b_b * t_b + (t_w + r) * t_w$	EN 1993-1-1 (mod) ECCS 85 (mod)
Sections en I soudées (FC 1)	$A_{vz} = \eta * h_w * t_w$ $A_{vy} = A - h_w * t_w$	EN 1993-1-1 EN 1993-1-1
Sections en U laminées (FC 5)	$A_{vz} = A - 2 * b * t_f + (t_w + r) * t_f$ $A_{vy} = 2 * b * t_f$	EN 1993-1-1 EN 1993-1-1 (mod)
Sections en U soudées (FC 5)	$A_{vz} = h_w * t_w$ $A_{vy} = A - h_w * t_w$	EN 1993-1-1 (mod) EN 1993-1-1
Sections en T laminées (FC 6)	$A_{vz} = A - b * t_f + (t_w + r) * \frac{t_f}{2}$ $A_{vy} = b * t_f$	EN 1993-1-1 EN1993-1-1 (mod)
Sections en T soudées (FC 6)	$A_{vz} = t_w * (h - \frac{t_f}{2})$ $A_{vy} = b * t_f$	EN 1993-1-1 EN 1993-1-1 (mod)
Sections creuses rectangulaires (RHS) laminées (FC 2)	$A_{vz} = A * h / (b + h)$ $A_{vy} = A * b / (b + h)$	EN 1993-1-1 EN 1993-1-1
Sections creuses rectangulaires (RHS) formées à froid (FC 2)	$A_{vz} = A * h / (b + h)$ $A_{vy} = A * b / (b + h)$	EN 1993-1-1 EN 1993-1-1
Sections creuses rectangulaires (RHS) soudées (FC 2)	$A_{vz} = \eta * 2 * h_w * t_w$ $A_{vy} = A - 2 * h_w * t_w$	EN 1993-1-1 EN 1993-1-1
Sections creuses circulaires (CHS) (FC 3)	$A_{vz} = 2 * A / \pi$ $A_{vy} = 2 * A / \pi$	EN 1993-1-1 EN 1993-1-1
Sections pleines rectangulaires (FC 7)	$A_{vz} = A$ $A_{vy} = A$	ECCS 85 ECCS 85
Sections pleines circulaires (FC 11)	$A_{vz} = A$ $A_{vy} = A$	ECCS 85 ECCS 85
IFBA (FC 154)	$A_{vz} = h * t_w + 2 * r * t_0 + 2 * r^2 * (1 - \pi/4)$ (avec h la hauteur de la section laminée) $A_{vy} = b_0 * t_0 + b_u * t_u$	ECCS 83 ECCS 83 (mod)

IFBB (FC 155)	$A_{vz} = h * t_w + 2 * r * t_u + 2 * r^2 * (1 - \pi/4)$ (avec h la hauteur de la section laminée) $A_{vy} = b_0 * t_0 + b_u * t_u$	ECCS 83 ECCS 83 (mod)
SFB (FC 153)	$A_{vz} = h * t_w + 4 * r * t_f + 4 * r^2 * (1 - \pi/4)$ (avec h la hauteur de la section laminée) $A_{vy} = 2 * b * t_f + b_u * t_u$	ECCS 83 ECCS 83 (mod)
THQ (FC 156)	$A_{vz} = 2 * h * t_w$ (avec h la hauteur de l'âme) $A_{vy} = b_0 * t_0 + b_u * t_u$	ECCS 83 ECCS 83 (mod)
Numériques	$A_{vz} = A_z * A_{vz} = A_z$ (pris de la section) $A_{vy} = A_y * A_{vy} = A_y$ (pris de la section)	

Chapitre 13: Annexe B – Exemple sur les chemins de calcul de l' Eurocode

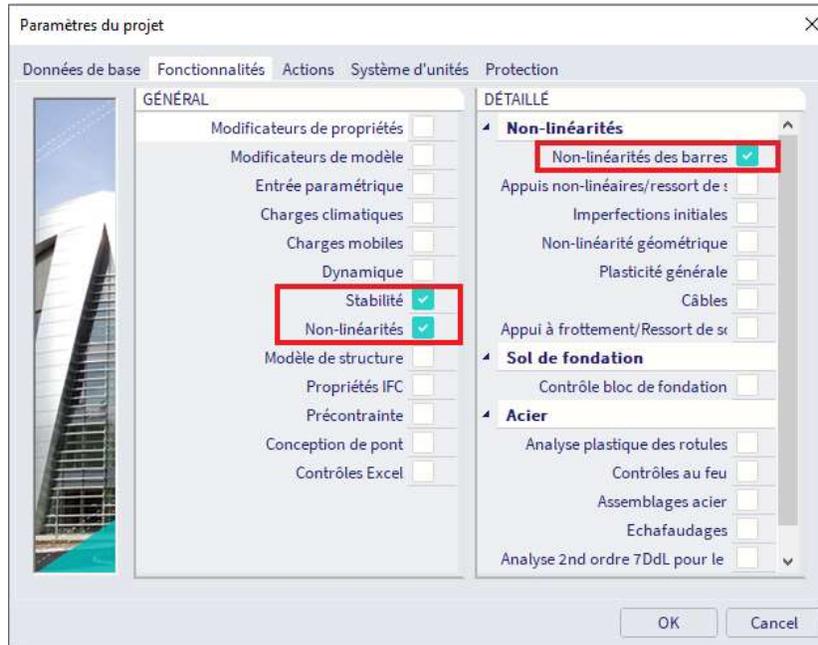
Cette annexe illustrera les chemins de calcul de l'Eurocode à travers quelques exemples. Le chemin 2B n'est pas donné car il ne peut pas être utilisé en pratique : ou bien vous saisissez une imperfection locale sur tous les éléments comme dans le chemin 2C, ou bien vous ne saisissez aucune imperfection locale comme dans le chemin 2a. Il est possible de définir une imperfection locale sur plusieurs éléments, mais le contrôle au flambement flexionnel sera toujours effectué sur tous les éléments ou sur aucun élément.

Projet exemple : 1 cas de charge contenant 3 charges ponctuelles de 500kN. Pour les exemples des chemins 1b, 2a, 2c et 3, les charges ont été augmentées à 750kN pour avoir un coefficient alpha critique plus petit.



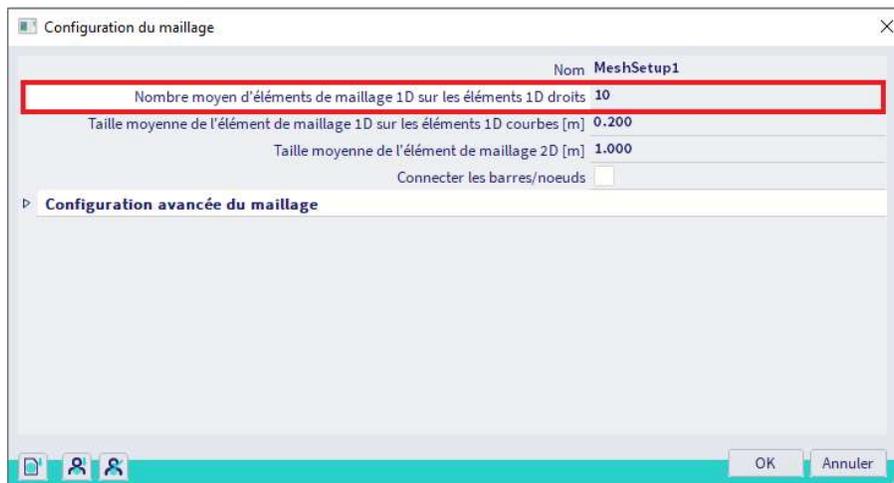
13.1. Chemin 1A : analyse au premier ordre

✚ Fonctionnalités



✚ Calcul de stabilité

Nous effectuons une analyse en stabilité pour vérifier si le coefficient alpha critique est supérieur à 10. Si c'est le cas, un calcul au premier ordre est suffisant. Comme mentionné dans le chapitre « Mode de flambement comme imperfection », le « Nombre moyen d'éléments de maillage 1D sur les éléments 1D droits » est mis à 10 :



Via le processus « Résultats » et « Multiplicateurs de charges critiques », on trouve un coefficient alpha critique de 11,93, donc une analyse au premier ordre est suffisante.

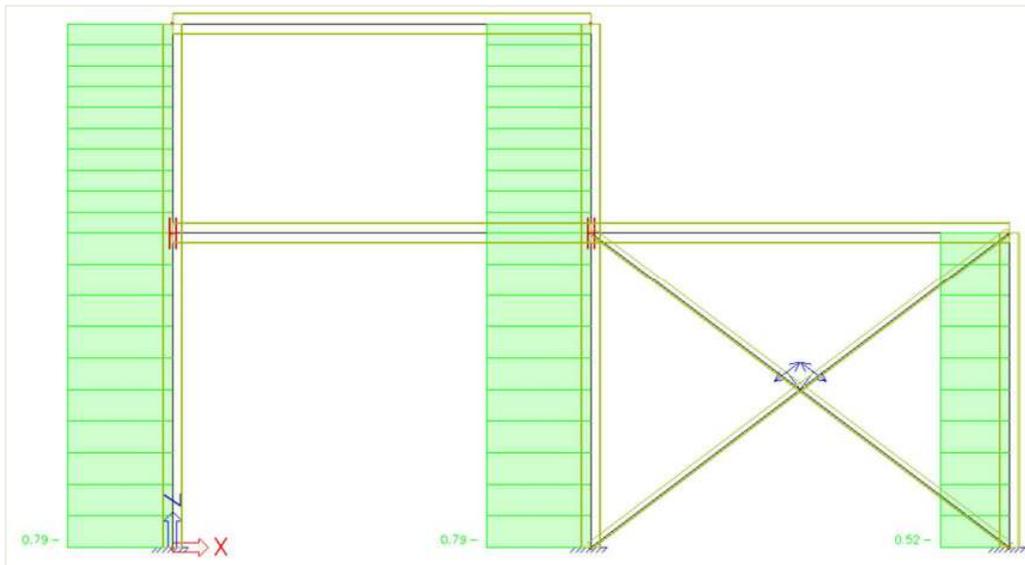
Calcul linéaire

Configuration des propriétés de flambement :

- Coefficient de flambement k : calculé par défaut par SCIA Engineer (valable seulement pour les structures simples) ;
- Propriété « déplaçable / non déplaçable » : proposition de SCIA Engineer d'être vérifié par vous comme utilisateur ;
- Longueur de référence de l'élément : proposition de SCIA Engineer d'être vérifié par vous comme utilisateur ;

Alternative : saisie manuelle du coefficient de flambement k ou de la longueur de référence !

Nous calculons le contrôle ELU sur le cas de charges BG1 : le contrôle unitaire pour le flambement flexionnel est décisif.

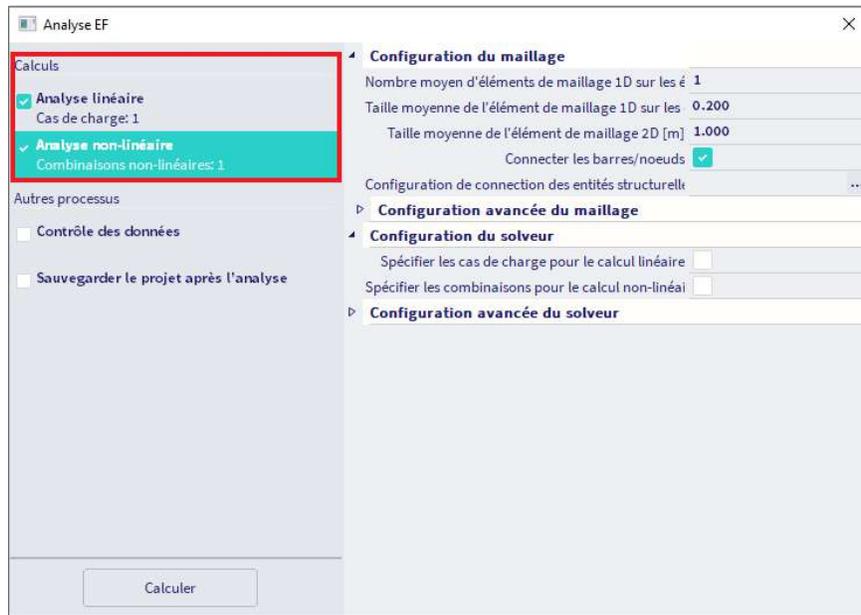


Calcul non linéaire

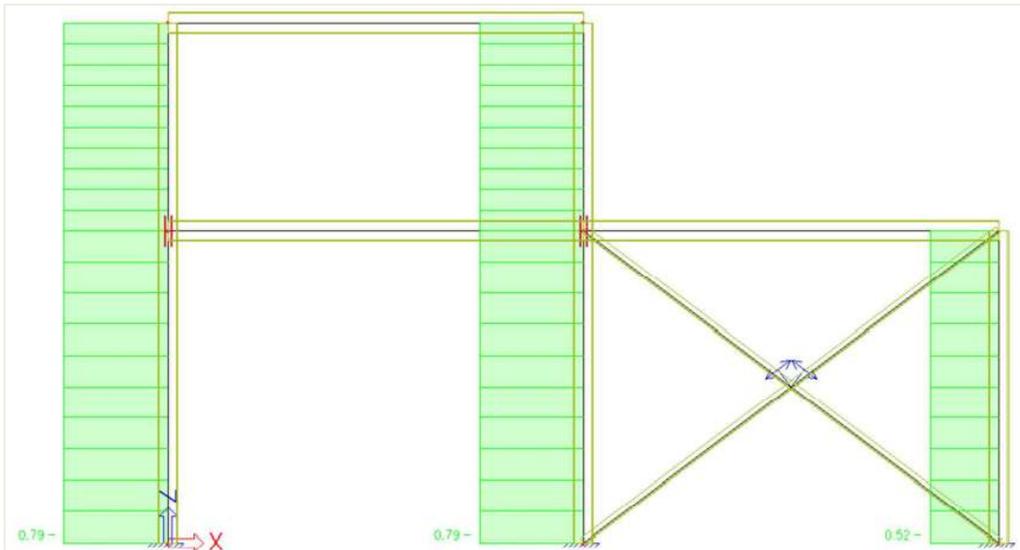
Même configuration des propriétés de flambement que pour le calcul linéaire.

La seule différence est la propriété « traction seule » (par la fonction « Non linéarité 1D ») qui a été ajoutée aux contreventements. Cela signifie qu'on parle toujours de calcul au premier ordre, mais un calcul non linéaire doit également être effectué pour prendre en compte la non linéarité locale « Traction seule ».

Attention : il est nécessaire d'effectuer à la fois un calcul linéaire et non linéaire, parce que les propriétés de flambement sont calculées uniquement pendant le calcul linéaire.

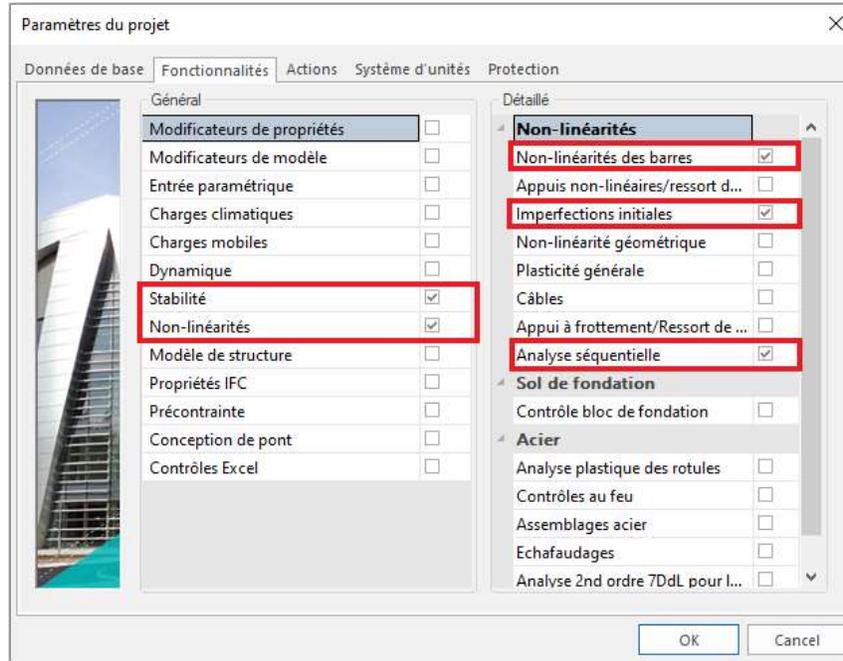


Nous calculons le contrôle ELU sur la combinaison non linéaire NC1 : le contrôle unité pour le flambement flexionnel est encore dimensionnant.



13.2. Chemin 1B : analyse au premier ordre

✚ Fonctionnalités



Note : La fonctionnalité « Analyse séquentielle » n'est pas encore supportée par l'environnement « standard » de post-traitement ni par la version 64b ; vous devez donc utiliser la version 32 bits et l'environnement « v16 et antérieures » pour cet exemple.

✚ Calcul de stabilité

Le calcul en stabilité sera effectué pour déterminer le coefficient alpha critique. Comme mentionné dans le chapitre « Mode de flambement comme imperfection », le « Nombre moyen d'éléments de maillage 1D sur les éléments 1D droits » est mis à 10.

La valeur de alpha critique doit être supérieure à 3 pour pouvoir utiliser ce chemin 1B du schéma de stabilité des portiques. Dans cet exemple, le coefficient de charge critique est égal à 7,95 (qui est donc entre 3 et 10).

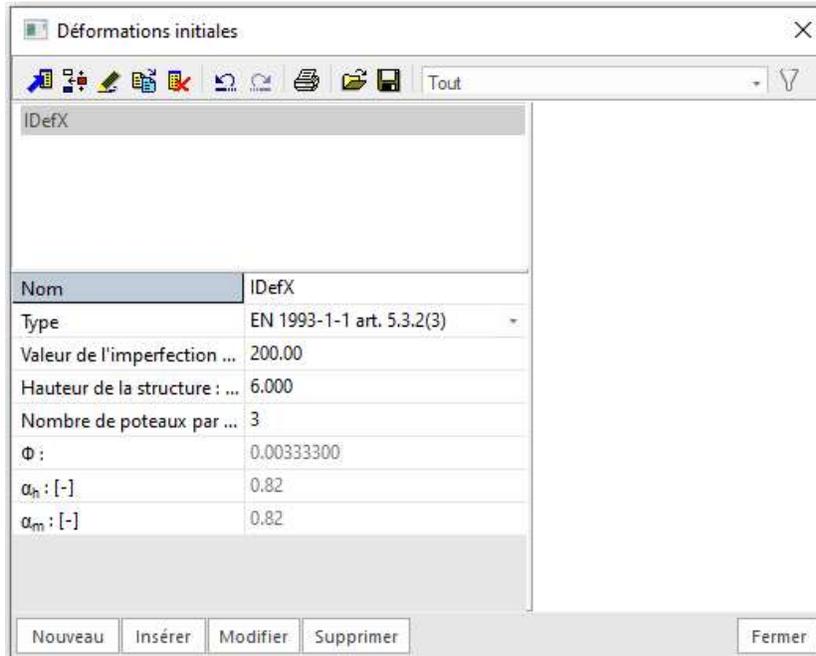
Multiplicateurs de charge critiques

N	f
-	□
Comb. de stabilité : S1	
1	7.95
2	22.98
3	24.18
4	26.65

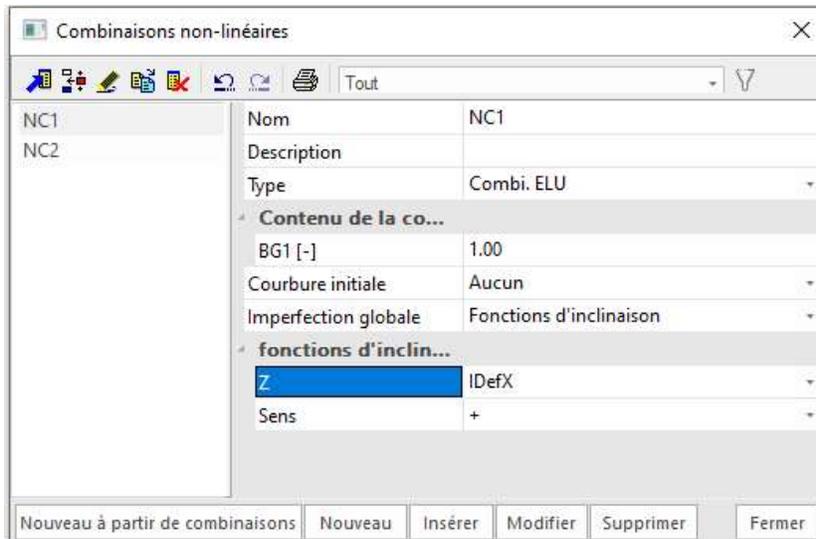
Imperfection globale

La prochaine étape est d'insérer une imperfection globale. Cela est fait par le menu principale « Bibliothèque » / « Structure, Analyse » / « Déformations initiales ».

Comme cet exemple est fait dans un environnement 2D, une déformation initiale dans la direction X est suffisante. Si ce projet était fait dans un environnement 3D, il faudrait créer deux déformations initiales (une dans la direction X et une dans la direction Y).

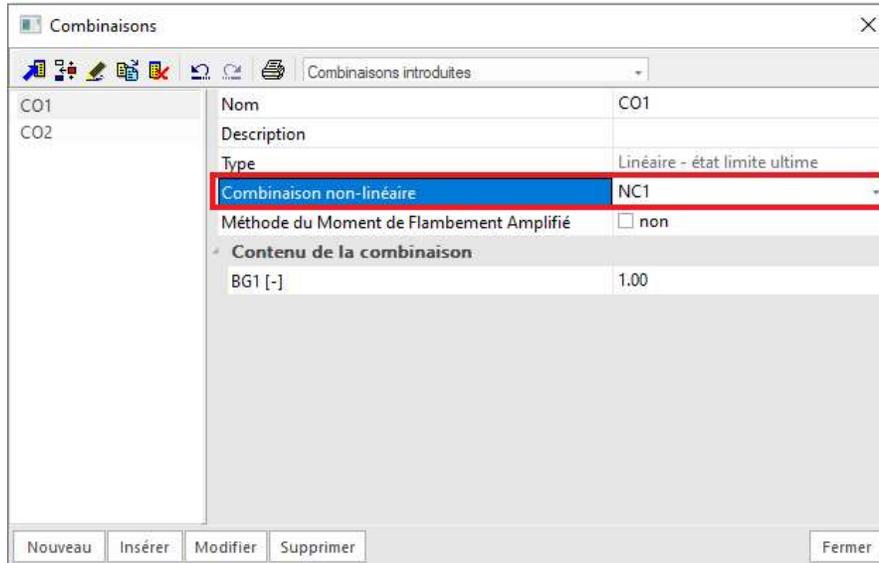


Cette imperfection globale peut maintenant être insérée dans une combinaison non linéaire, une fois dans la direction X positive, une fois dans la direction X négative :



Combinaison linéaire

Les imperfections insérées doivent être utilisées pendant le calcul linéaire. Cela peut se faire en se référant à la bonne combinaison non linéaire dans la fenêtre de combinaison linéaire :



La « méthode du Moment de Flambement Amplifié » peut être utilisée uniquement si l'effort normal N_{Ed} est inférieur à 25% de l'effort critique d'Euler N_{cr} . Ces deux valeurs sont données dans la sortie détaillée du contrôle ELU. Pour le poteau S1 :

La position du contrôle critique est 0.000 m

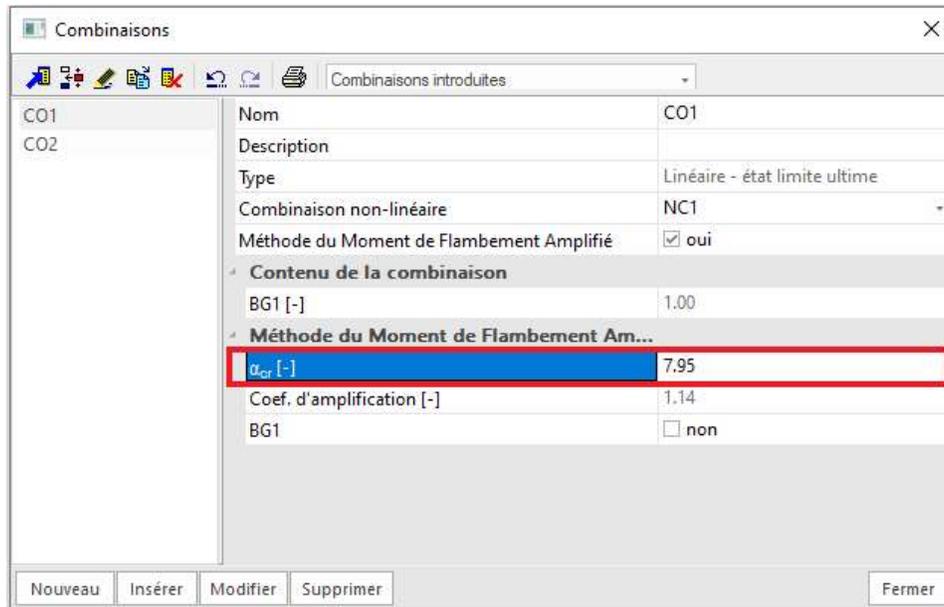
Efforts internes		Calculé	Unité
Effort normal	N_{Ed}	-750.07	kN
Effort tranchant	$V_{y,Ed}$	0.00	kN
Effort tranchant	$V_{z,Ed}$	-0.17	kN
Torsion	T_{Ed}	0.00	kNm
Moment de flexion	$M_{y,Ed}$	0.34	kNm
Moment de flexion	$M_{z,Ed}$	0.00	kNm

Contrôle flambement flexionnel

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.46)

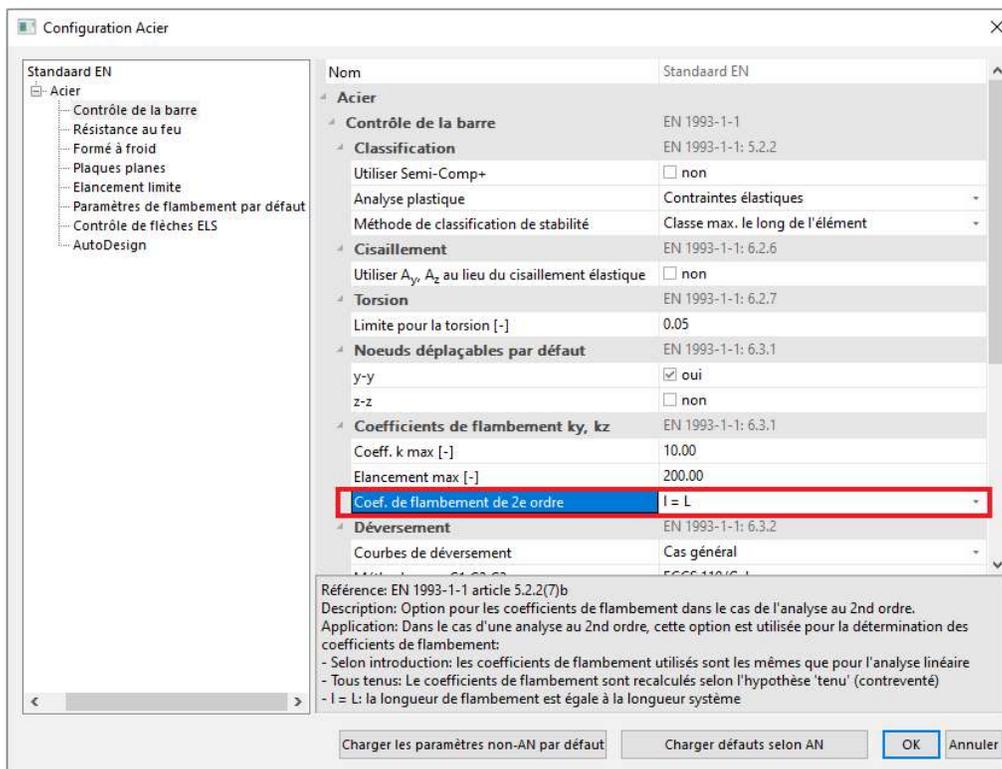
Paramètres de flambement		yy	zz	
Noeuds déplaçables		non-déplaçable	non-déplaçable	
Longueur système	L	3.000	5.000	m
Coefficient de flambement	k	1.00	1.00	
Longueur de flambement	l_{cr}	3.000	5.000	m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	8497.73	1110.92	kN
Elancement	λ	36.22	100.19	
Elancement relatif	λ_{rel}	0.39	1.07	
Elancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.20	0.20	
Courbe de flambement		b	c	
Imperfection	a	0.34	0.49	
Coefficient de réduction	χ	0.93	0.50	
Résistance au flambement	$N_{b,Rd}$	1177.95	634.92	kN

Puis la « méthode du Moment de Flambement Amplifié » peut être activée dans les combinaisons linéaires et la valeur du alpha critique doit être insérée :

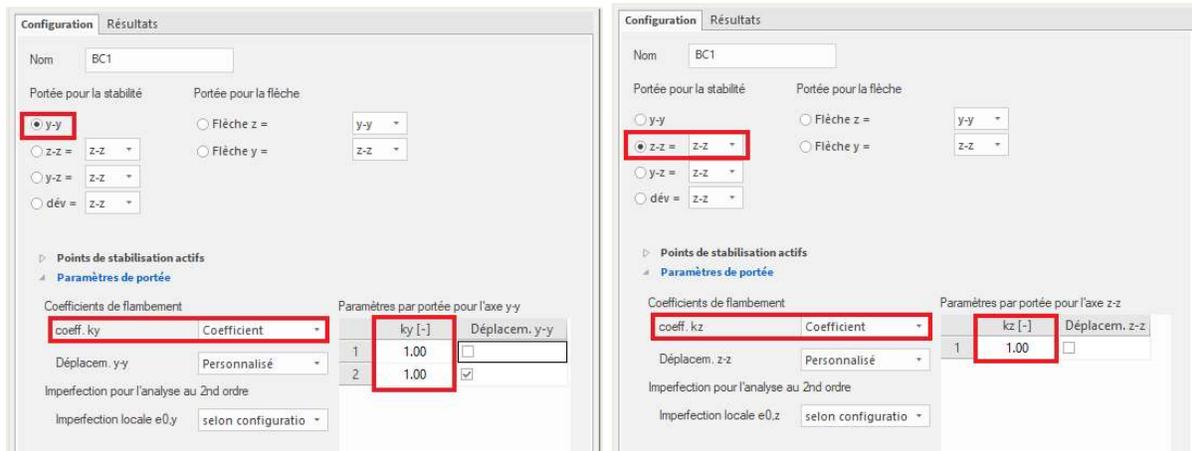


🔗 Calcul linéaire

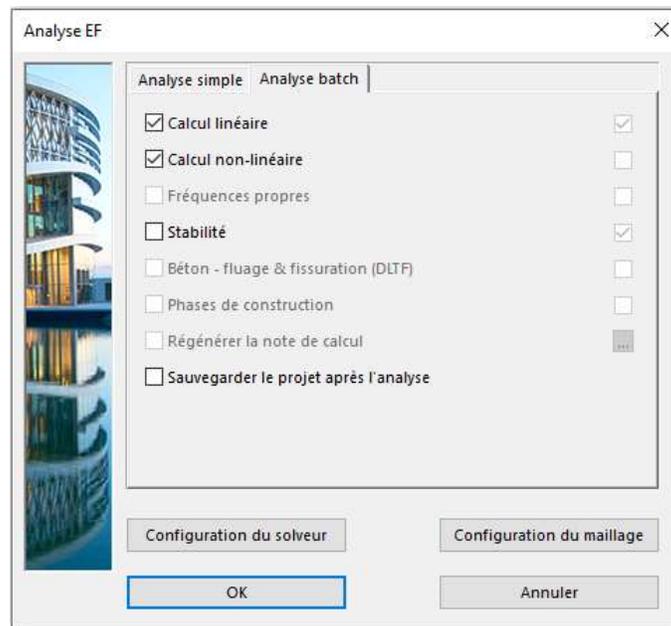
Les longueurs de flambement sont prises égales aux longueurs de référence. Cela peut se faire dans la fenêtre de « Configuration Acier » :



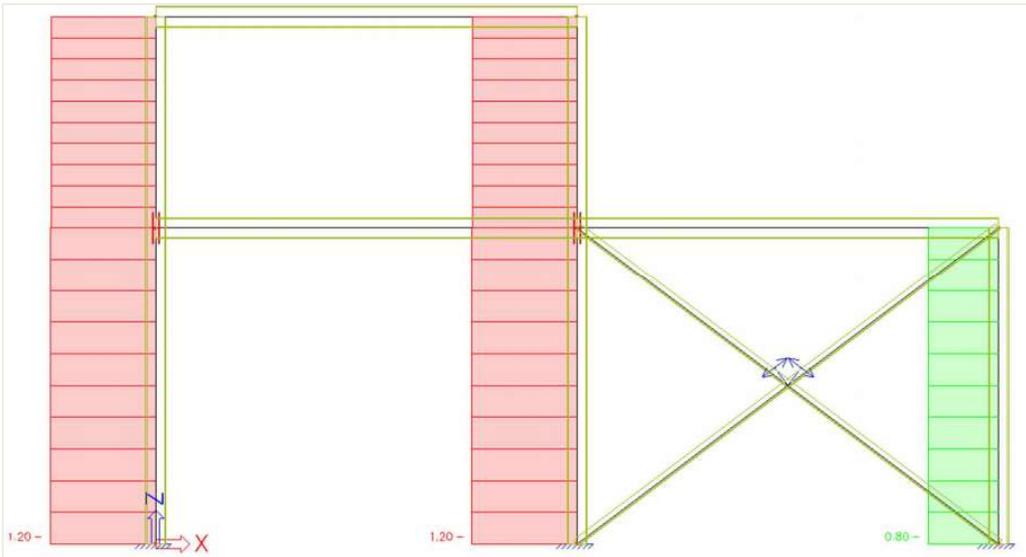
Cela peut aussi se faire en imposant manuellement les coefficients de flambement à 1 pour y-y et z-z dans la fenêtre des « Longueurs de référence et paramètres de flambement » :



Dans la prochaine étape, le calcul peut être effectué. Les imperfections globales ayant été insérées dans les combinaisons non linéaires, les calculs linéaires et non linéaires doivent être lancés :

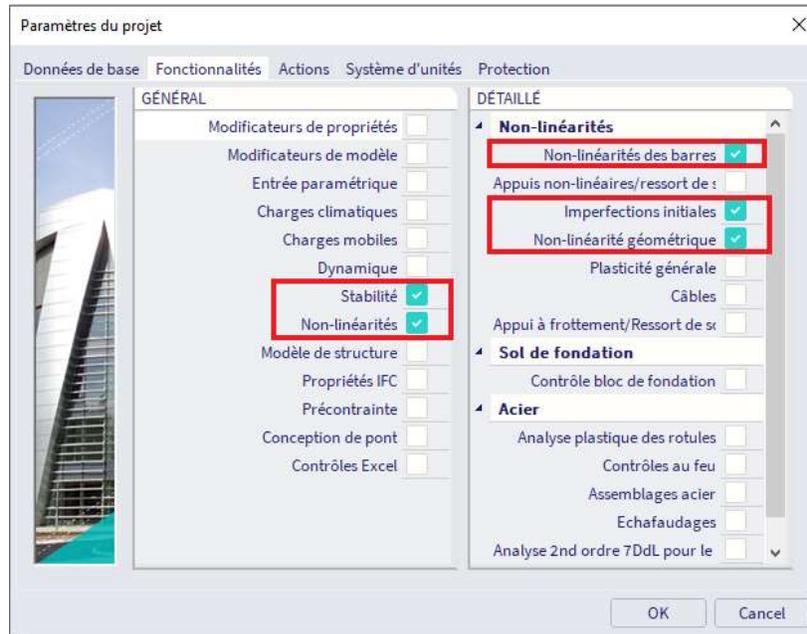


Nous calculons le contrôle ELU pour la classe de résultats « RC NL » : le contrôle unité pour le flambement flexionnel est dimensionnant.



13.3. Chemin 2A : analyse au second ordre – imperfection global

✚ Fonctionnalités



✚ Calcul de stabilité

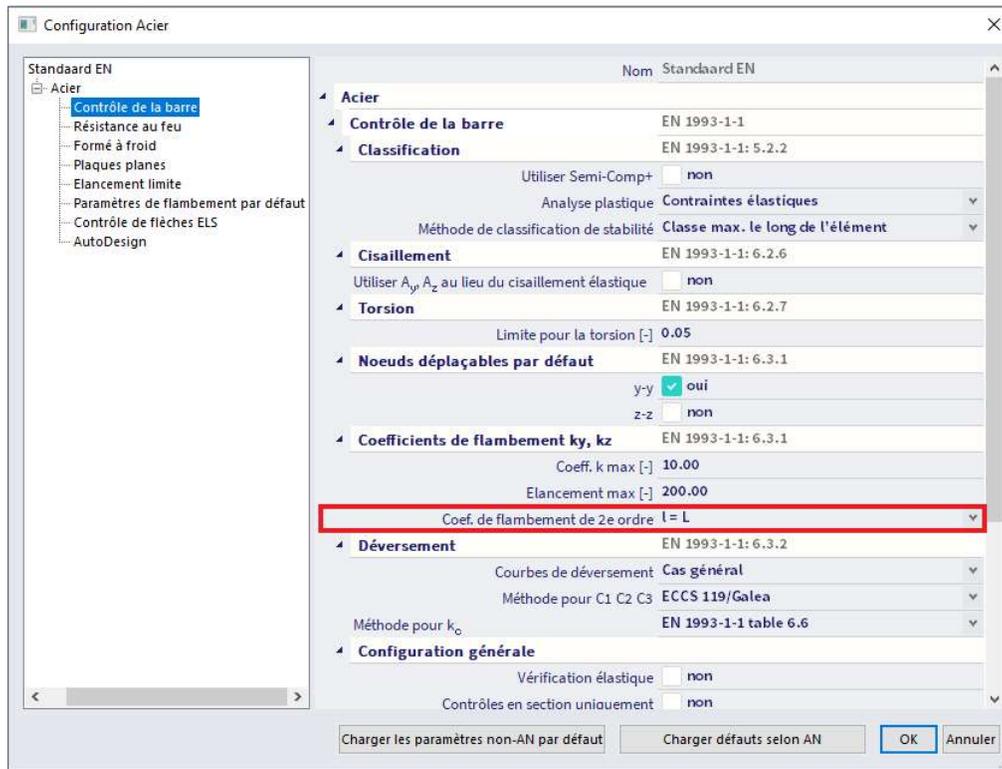
Le calcul en stabilité sera effectué pour déterminer le coefficient alpha critique. Comme la valeur du alpha critique est inférieure à 10, nous ne pouvons pas suivre le chemin 1A du schéma de l'Eurocode, donc nous appliquerons le chemin 2A.

✚ Imperfection globale

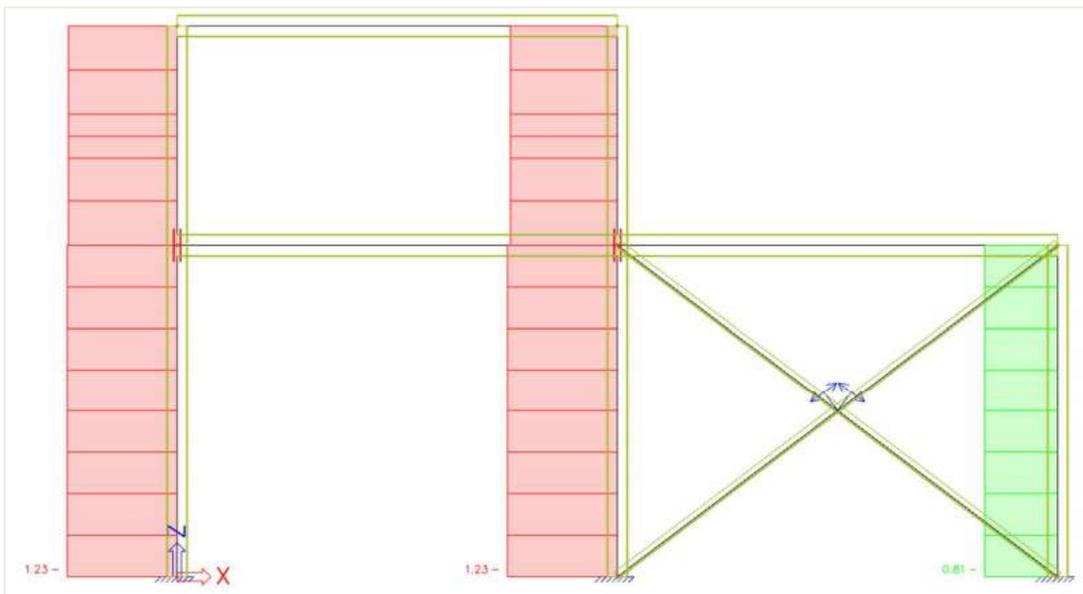
Cf le chapitre précédent.

✚ Configuration Acier

La structure entière peut être considérée à nœuds « non déplaçables », ce qui signifie que $l \leq L$ (ou de manière conservative $l = L$). SCIA Engineer effectuera le contrôle en flambement flexionnel avec $k = 1$.

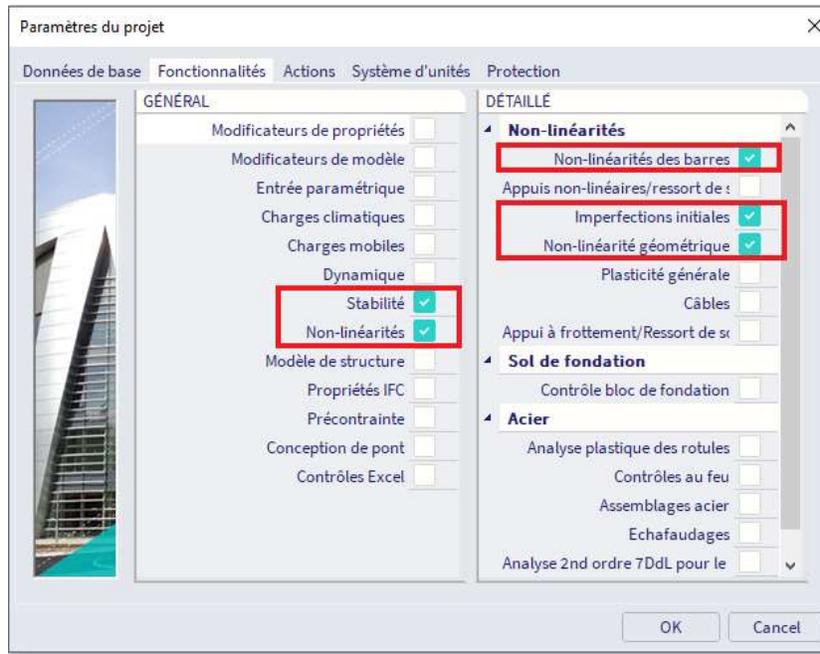


Nous calculons le contrôle ELU pour la classe de résultats « RC NL » : le contrôle unité pour la flexion et compression combinées est dimensionnant.



13.4. Chemin 2C : analyse au second ordre – imperfection globale + locale

✚ Fonctionnalités



✚ Calcul de stabilité

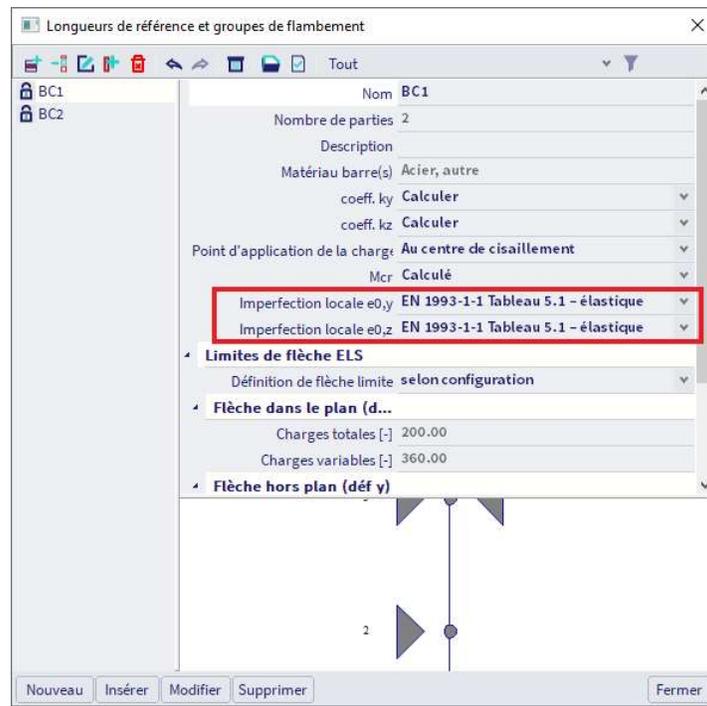
Le calcul en stabilité sera effectué pour déterminer le coefficient alpha critique. Comme la valeur du alpha critique est inférieure à 10, nous ne pouvons pas suivre le chemin 1A du schéma de l'Eurocode, donc nous appliquerons le chemin 2C.

✚ Imperfection globale

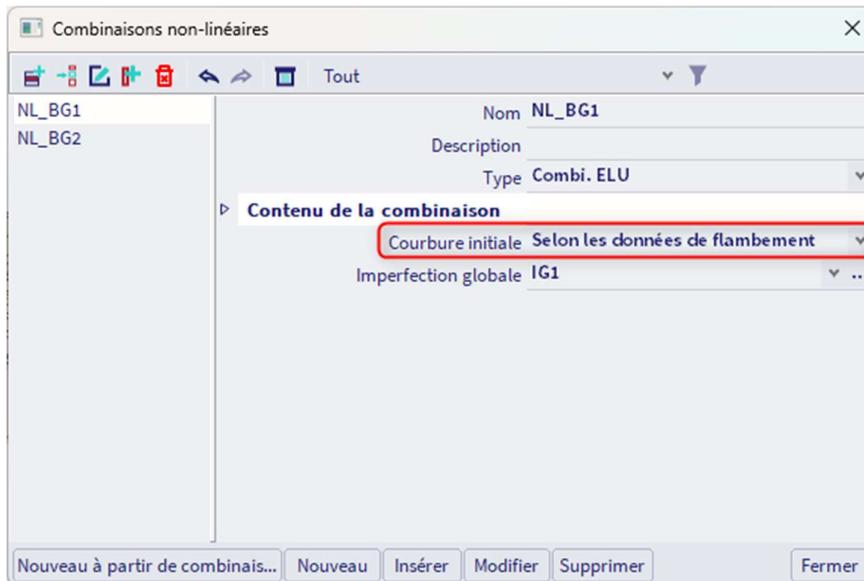
Cf le chapitre précédent.

✚ Imperfection en arc

L'imperfection en arc e_0 est insérée dans la fenêtre des « Groupes de flambement » du processus « Acier » :



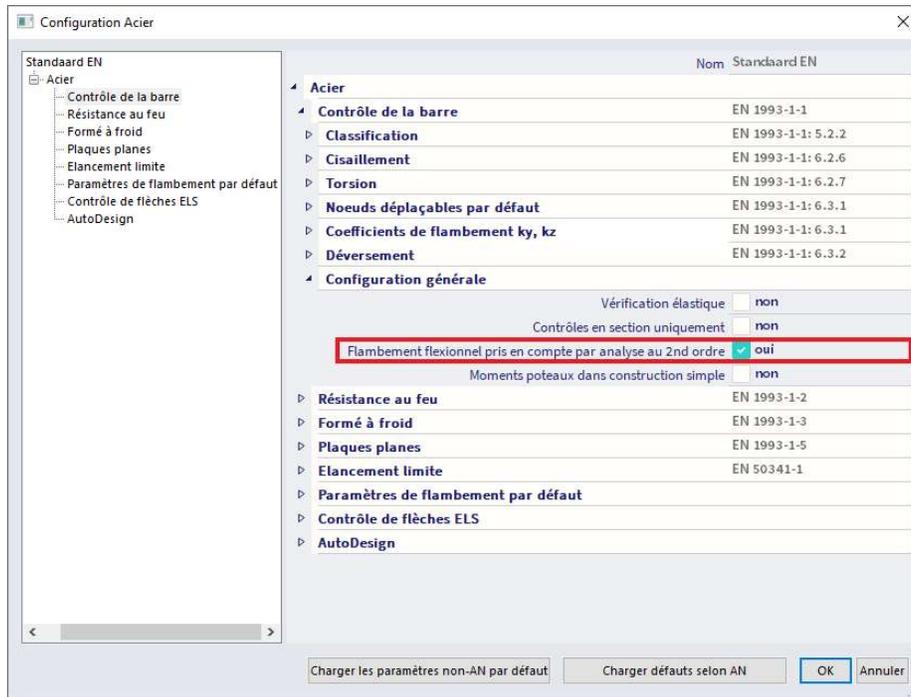
Et dans les combinaisons non linéaires, une référence est faite à cette donnée de flambement :



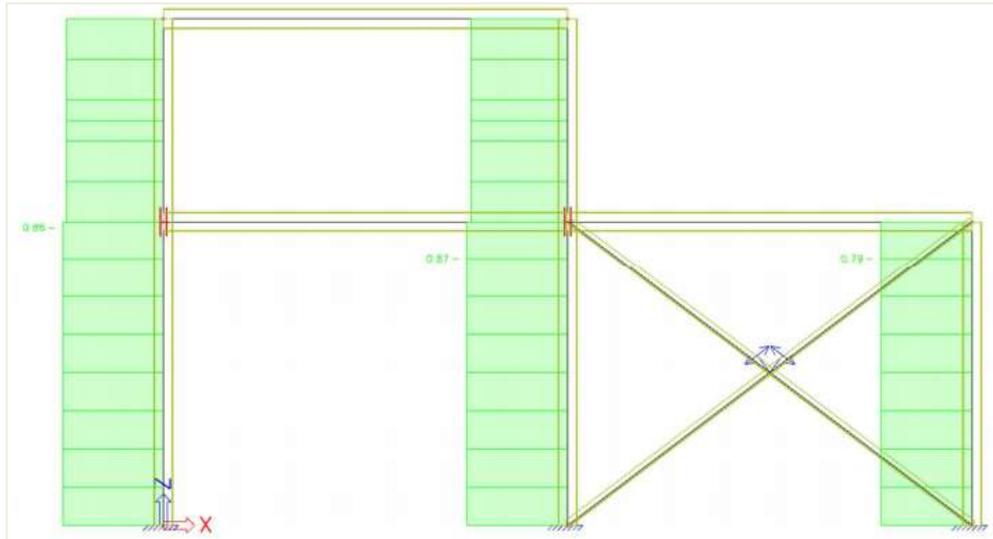
Configuration Acier

Selon l'Eurocode, il n'est plus nécessaire dans ces conditions d'effectuer un contrôle en flambement flexionnel.

SCIA Engineer effectuera le contrôle du flambement flexionnel avec $k = 0,001$, pour qu'il ne soit pas dimensionnant.

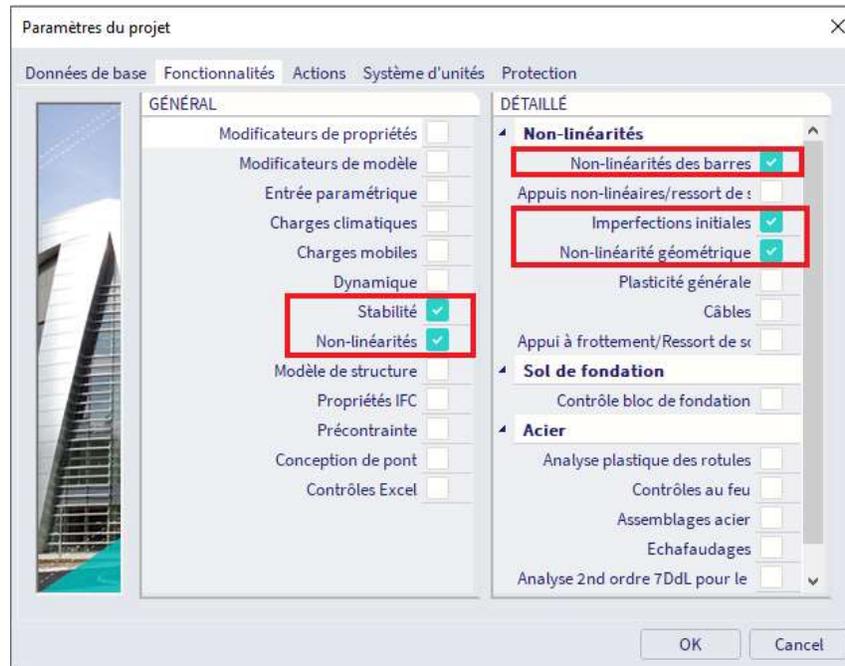


Nous calculons le contrôle ELU pour la classe de résultats « RC NL » : le contrôle unité pour la flexion et compression combinées est dimensionnant.



13.5. Chemin 3 : analyse au second ordre – mode de flambement comme imperfection

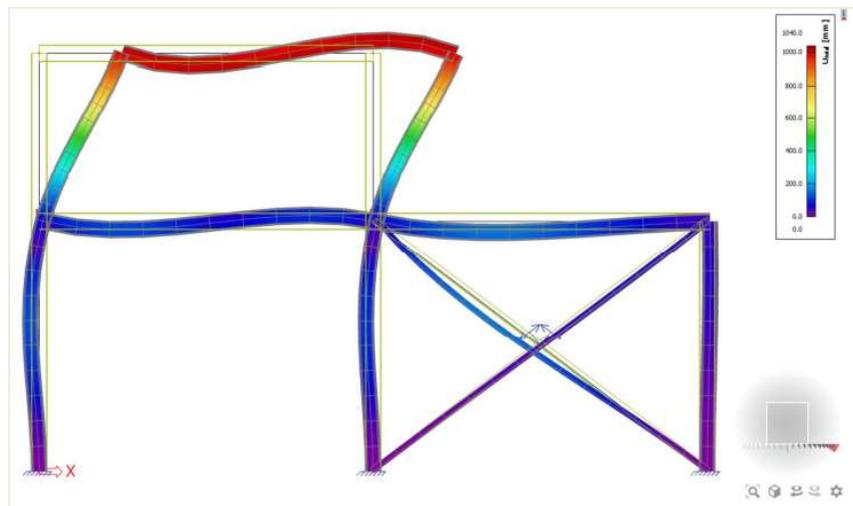
✚ Fonctionnalités



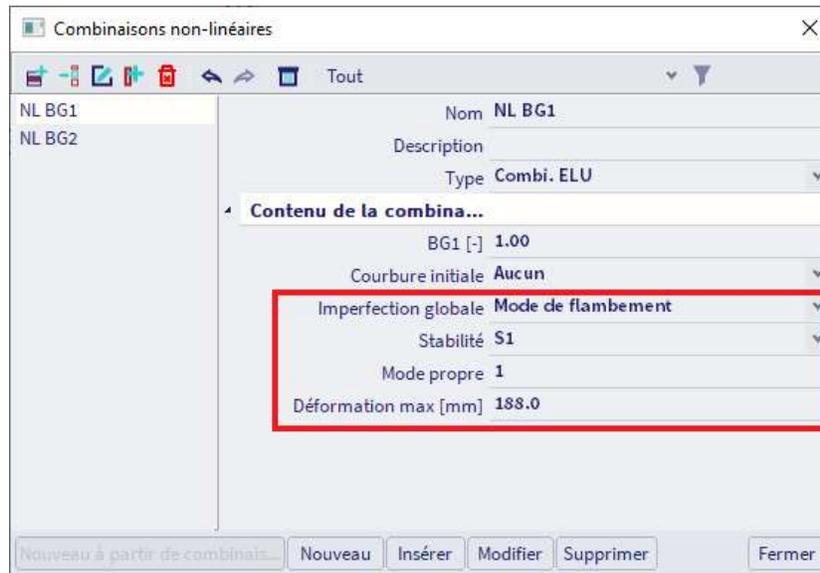
✚ Calcul de stabilité

Cf les chapitres précédents.

Le premier mode de flambement ressemble à :



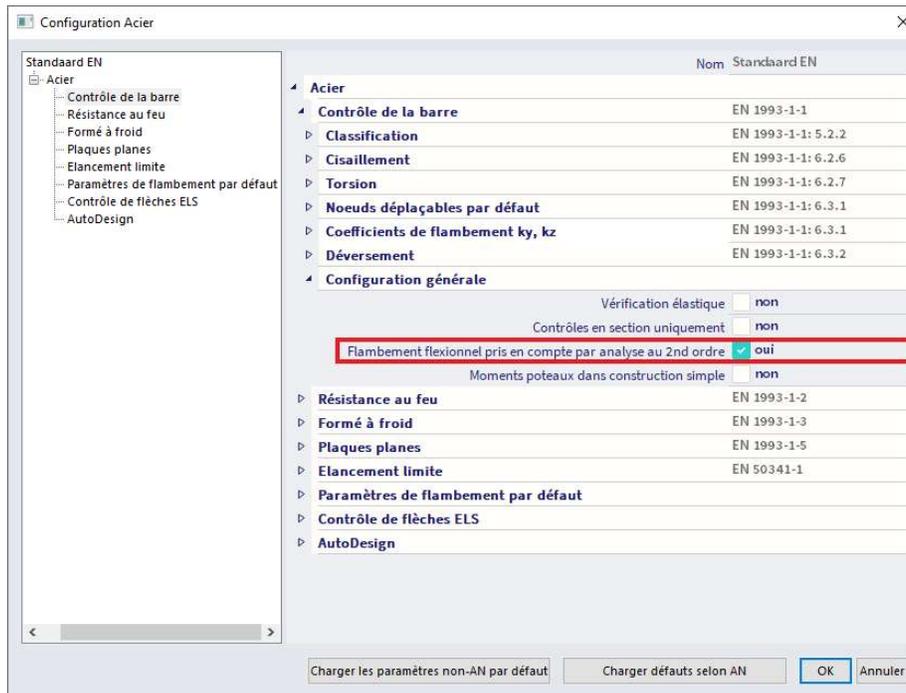
Calcul de η_{init} => doit être saisi comme « Déformation max [mm] » (dans la fenêtre des combinaisons non linéaires) :



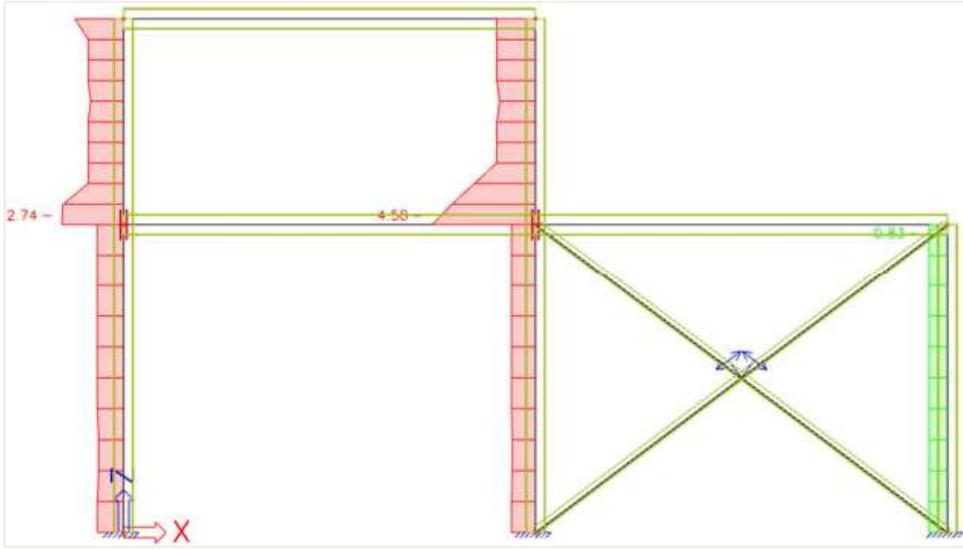
🔧 Configuration Acier

Selon l'Eurocode, il n'est plus nécessaire dans ces conditions d'effectuer un contrôle en flambement flexionnel.

SCIA Engineer effectuera le contrôle du flambement flexionnel avec $k = 0,001$, pour qu'il ne soit pas dimensionnant.



Nous calculons le contrôle ELU pour la classe de résultats « RC NL » : le contrôle unité pour la flexion, l'effort normal et l'effort de cisaillement combinés est dimensionnant.



Chapitre 14: Références et littératures

- [1] Eurocode 3: Design of steel structures Part 1 – 1 : General rules and rules for buildings ENV 1993-1-1:1992, 1992
- [2] Essentials of Eurocode 3 Design Manual for Steel Structures in Building ECCS – N° 65, 1991
- [3] R. Maquoi Eléments de constructions métallique Ulg. Faculté des Sciences Appliquées 1988
- [4] ENV 1993-1-3:1996 Eurocode 3 : Design of steel structures Part 1-3: General rules Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting CEN 1996
- [5] Eurocode 3 Design of steel structures Part 1 – 1/A1: General rules and rules for buildings ENV 1993-1-1:1992/A1, 1994
- [6] Eurocode 3 Design of steel structures Part 1 – 2: General rules – Structural fire design EN 1993-1-2:2005, 2005
- [7] Model Code on Fire Engineering ECCS – N° 111 May 2001
- [8] Eurocode 1 Basis of design and actions on structures Part 2-2: Actions on structures – Actions on structures exposed to fire EN 1991-1-2:2002
- [9] DIN 18800 Teil 1 Stahlbauten Bemessung und Konstruktion DK 693.814.014.2, November 1990
- [10] DIN 18800 Teil 2 Stahlbauten Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben and Stabwerken DK 693.814.074.5, November 1990
- [11] DIN 18800 Teil 3 Stahlbauten Stabilitätsfälle, Plattenbeulen DK 693.814.073.1, November 1990
- [12] G. Hünersen, E. Fritzsche Stahlbau in Beispielen Berechnungspraxis nach DIN 18800 Teil 1 bis Teil 3 (11.90) Werner Verlag, Düsseldorf 1991 References and literature BV – 2021/02/22 161
- [13] E. Kahlmeyer Stahlbau nach DIN 18800 (11.90) Werner Verlag, Düsseldorf
- [14] Beuth-Kommentare Stahlbauten Erläuterungen zu DIN 18 800 Teil 1 bis Teil 4, 1.Auflage Beuth Verlag, Berlin-Köln 1993
- [15] Stahlbau Kalender 1999 DSTV Ernst & Sohn, 1999
- [16] Roik, Carl, Lindner Biegetorsionsprobleme gerader dünnwandiger Stäbe Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn 1972
- [17] DASt-Richtlinie 016 Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen Stahlbau-Verlagsgesellschaft – 1992
- [18] H. Rubin Interaktionsbeziehungen für doppelsymmetrische I- und Kasten-Querschnitte bei zweiachsiger Biegung und Normalkraft Der Stahlbau 5/1978, 6/1978
- [19] Stahl im Hochbau 14. Auflage, Band I / Teil 2 1986, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf
- [20] Staalconstructies TGB 1990 Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies NEN 6770, december 1991
- [21] Staalconstructies TGB 1990 Stabiliteit NEN 6771, december 1991
- [22] Staalconstructies TGB 1990 Stabiliteit NEN 6771, januari 2000

- [23] NEN 6072 Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen Staalconstructies December 1991
- [24] NEN 6072/A2 – Wijzigingsblad Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen Staalconstructies December 2001
- [25] NEN 6702 Belastingen en vervormingen TGB 1990 December 1991 Advanced Concept Training – Steel code check 162 BV – 2021/02/22
- [26] Handleiding moduull STACO VGI Staalbouwkundig Genootschap Staalcentrum Nederland 5684/82
- [27] Newmark N.M. A simple approximate formula for effective end-fixity of columns J.Aero.Sc. Vol.16 Feb.1949 pp.116
- [28] Stabiliteit voor de staalconstructeur uitgave Staalbouwkundig Genootschap
- [29] Rapportnr. BI-87-20/63.4.3360 Controleregels voor lijnvormige constructie-elementen IBBC Maart 1987
- [30] Y. Galéa Flambement des poteaux à inertie variable Construction Métallique 1-1981
- [31] I. Vayas Interaktion der plastischen Grenzschnittgrößen doppelsymmetrischer I-Querschnitte Stahlbau 69 (2000), Heft 9
- [32] SCIA Engineer Steel Code Check Theoretical Background 04/2011
- [33] Eurocode 3 Design of steel structures Part 1 – 1: General rules and rules for buildings EN 1993-1-1:2005
- [34] Rules for Member Stability in EN 1993-1-1 Background documentation and design guidelines ECCS - N° 119 2006
- [35] Lateral-Torsional buckling of steel beams: A general expression for the moment gradient factor. A. López, D. J. Yong, M. A. Serna Stability and Ductility of Steel Structures, 2006
- [36] Valorization Project Semi-Comp+ N° RFS2-CT-2010-00023 Background Information 22 March 2012
- [37] SN001a-EN-EU NCCI: Critical axial load for torsional and flexural torsional buckling modes Access Steel, 2006 www.access-steel.com