

Advanced Concept Training Steel Code Check

All information in this document is subject to modification without prior notice. No part of this manual may be reproduced, stored in a database or retrieval system or published, in any form or in any way, electronically, mechanically, by print, photo print, microfilm or any other means without prior written permission from the publisher. SCIA is not responsible for any direct or indirect damage because of imperfections in the documentation and/or the software.

© Copyright 2015 SCIA nv. All rights reserved.

Sommaire

Introduction.....	1
Section droites.....	2
Matériaux.....	6
Classification de section	9
Contrôle de section à l'ELU.....	17
Coefficients partiels de sécurité.....	17
Traction	17
Compression	18
Moment de flexion	19
Cisaillement	20
Torsion	21
Contrôle d'interaction : Flexion, cisaillement et force axiale	26
Contrôle de stabilité à l'ELU.....	29
Classification	29
Contrôle de Flambement	30
Coefficients de flambement.....	32
Longueur de flambement	42
Coefficients de flambement/longueurs : introduction manuelle	45
Contrôle de flambement flexionnel dans SCIA Engineer.....	46
Flambement torsionnel.....	48
Déversement	49
Général.....	49
Calcul de M_{cr}	55
Appuis de déversement.....	61
Diaphragmes.....	66
Déversement en utilisant le LTBII – Pas dans l'édition Concept	69
Contrôle de compression et de flexion.....	71
Contrôle de flambement par cisaillement – EN 1993-1-5	74
Général.....	74
Raidisseurs.....	75
Contrôle ELU pour les barres composées en compression.....	78
ULS Check for Built-in beams.....	83
Optimisation.....	86
Optimisation de section droite	86
Optimisation générale.....	90
Calcul au 2 nd ordre et imperfections	93
Général	93
Alpha critique – Pas dans l'édition concept.....	95
Imperfection global de portique ϕ	95
Imperfection locale.....	98
$N_{Ed} > 25\% N_{cr}$	98
Imperfection locale e_0	99
Forme de flambement comme imperfection - η_{cr} – Pas dans l'édition concept	101
Analyse de 1 ^{er} ou 2 ^{ème} ordre – Chemins selon l'EN1993:.....	106
Exemple Overview	107
Chemin 1a Analyse au 1 ^{er} ordre	107
Chemin 2a Analyse au 2 nd ordre – Imperfection globale (inclinaison initiale).....	109
Chemin 2c Analyse au 2 nd ordre – Imperfection globale (inclinaison initiale) + imperfection locale (courbure)	110

Chemin 3 Analyse au 2 nd ordre – Forme de flambement remplace l'imperfection locale et globale	111
Contrôle ELS	113
Déplacement des nœuds	113
Déformation relative	113
Contrôle de résistance au feu - Pas dans l'édition concept	117
Général	117
Courbes Température temps	117
Température de l'Acier	118
Propriétés de l'Acier	119
Propriété de résistance au feu dans SCIA Engineer	121
Domaine de résistance	122
Principe	123
Exemple dans SCIA Engineer.....	123
Domaine Température/temps	127
Principe	127
Exemple dans SCIA Engineer.....	128
Références et littérature	132

Introduction

Ce cours traite du calcul de l'acier selon l'EN 1993-1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments et l'EN 1993-1-2 : Règles générales-Calcul du comportement au feu.

La plupart des options dans le cours peuvent être calculées/contrôlée dans SCIA Engineer avec l'**Edition Concept**.

Pour certains contrôles supplémentaires, un module supplémentaire (ou édition) est requis, mais cela sera toujours indiqué.

Section droites

SCIA Engineer va utiliser les axes y-y et z-z respectivement pour les axe principaux fort et faible de la section droite.

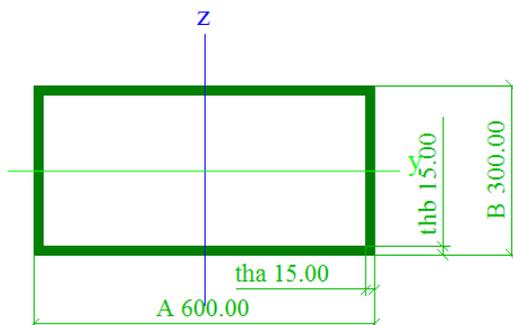
Si les axes principaux ne correspondent pas aux axes y-y et z-z selon l'EN 1993-1-1 ils sont indiqués :

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

Dans le contrôle acier, l'axe fort sera toujours considéré comme étant l'axe y-y. Lorsque vous introduisez une section pour laquelle l'axe local y ne correspond pas à l'axe fort, les axes sont inversés dans le contrôle acier et SCIA Engineer donnera un message à propos des axes.

Exemple: Local Axes.esa

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



Cette poutre est seulement chargée par une charge linéaire dans la direction z, ce qui donne un moment M_y et un effort tranchant V_z .

Lorsque l'on regarde le contrôle acier, les axes sont inversés et l'axe fort est pris comme étant l'axe local y :

The critical check is on position 0.000 m

Axis definition :

- principal y- axis in this code check is referring to the principal z axis in Scia Engineer
- principal z- axis in this code check is referring to the principal y axis in Scia Engineer

Internal forces		
NEd	0.00	kN
Vy,Ed	300.00	kN
Vz,Ed	0.00	kN
TEd	0.00	kNm
My,Ed	0.00	kNm
Mz,Ed	300.00	kNm

Ceci est indiqué dans le contrôle acier et les efforts internes sont aussi inversés suivant les nouveaux axes locaux.

Les sections suivantes sont classifiées au cours des contrôles acier.

Seules les sections I indiquées ci-dessous sont reconnues. Les autres formes I ne sont pas reconnues comme des profilés I et la classification, par exemple, ne peut pas être exécutée.

I	I Symétrique	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
	PRS	
RHS	Section Rectangulaire Creuse	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
CHS	Section Circulaire Creuse	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
L	Cornière	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
U	Section U	

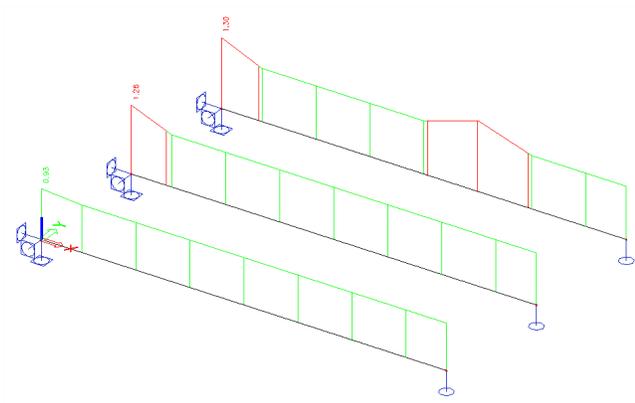
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
T	Section T	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
	PRS	
PPL	I asymétrique	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
	PRS	
Z	Section Z	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
RS	Sections rectangulaires	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
O	Tube Plein	
	de la bibliothèque	
	géométrique formé à froid	
Σ	Sections Formées à Froid	
	de la bibliothèque	
	paires 2CFUo	
	paires 2CFUc	

	aires 2CFCo	
	aires 2CFCc	
	aires 2CFLT	
	Section Générale : paroi mince	
NUM	Section numérique	
	Section numérique	
COM	Toutes les autres	

Les profilés standards (de la bibliothèque) ont des propriétés et des dimensions de section fixes qui sont dans la bibliothèque des profilés. Les propriétés de section et les propriétés de dimension requises sont décrites dans le Theoretical Background (Ref.[32]).

Exemple : Cross Section.esa

- 3 sections droites :
 - o HEA300 de la bibliothèque
 - o HEA300 introduit comme section droite générale (Importée d'un dwg)
 - o HEA 300 introduit comme forme géométrique générale
- Seul le premier profilé est reconnu comme une forme I symétrique
- Le deuxième et troisième profilés ne sont pas reconnus comme une forme I symétrique
- Le premier profilé sera classifié comme un profilé I et un contrôle plastique sera exécuté.
- Les deuxième et troisième profilés ne peuvent pas être classifiés, un contrôle élastique sera donc exécuté. Cela donnera des contrôles différents :



Remarque :

La section générale ne peut pas être importée dans SCIA Engineer avec l'édition concept. Pour cette option, l'édition Professional ou Expert est nécessaire ou le module esa.07.

Matériaux

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

Les nuances d'acier standards comme définis dans le Tableau 3.1 de l'EN 1993-1-1 sont :

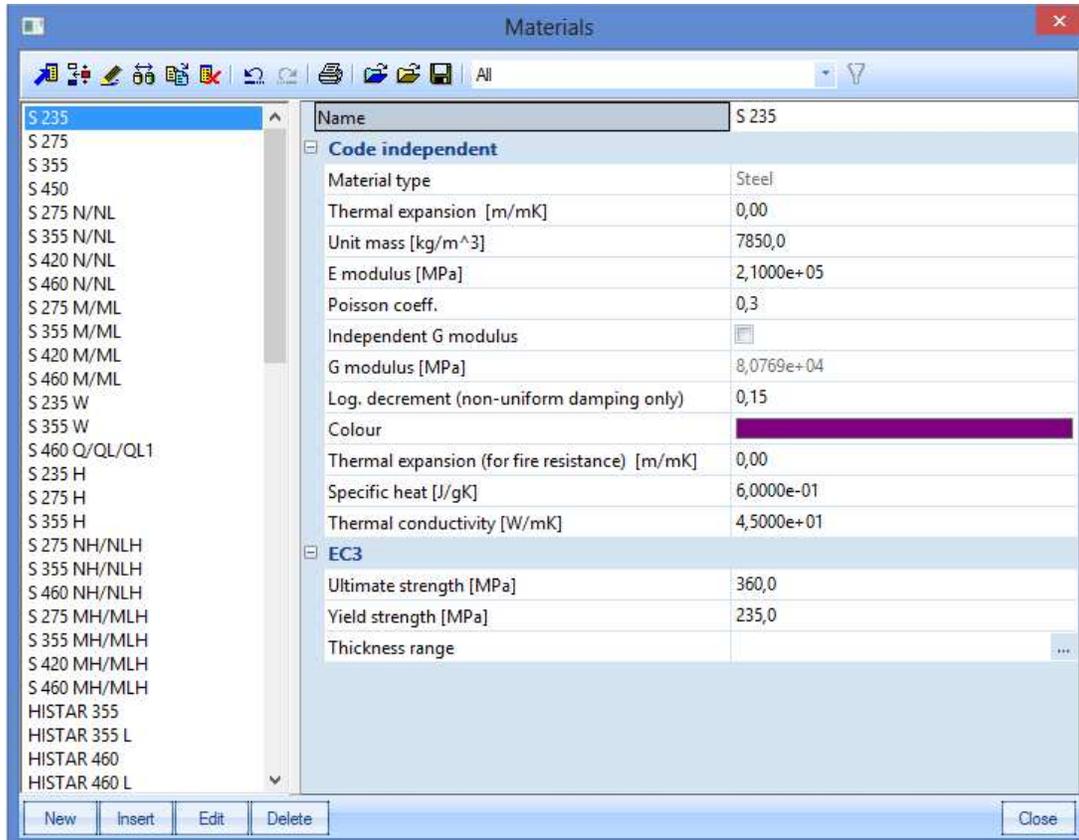
Table 3.1: Nominal values of yield strength f_y and ultimate tensile strength f_u for hot rolled structural steel

Standard and steel grade	Nominal thickness of the element t [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

Table 3.1 (continued): Nominal values of yield strength f_y and ultimate tensile strength f_u for structural hollow sections

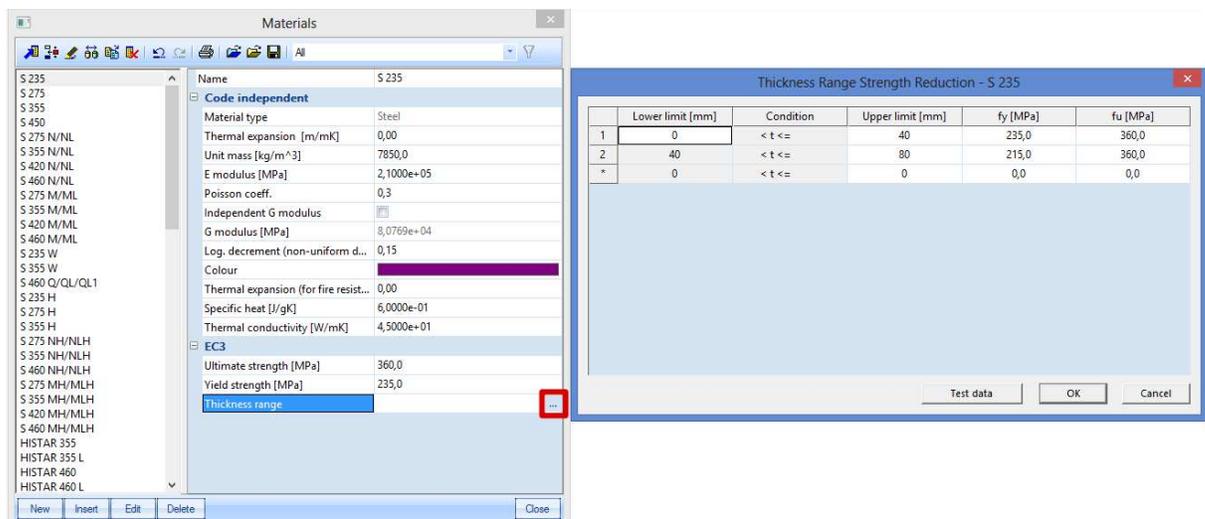
Standard and steel grade	Nominal thickness of the element t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	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 :



Les nuances Hystar et Fritonar ont été implémentées selon Arcelor.

Avec l'option "Influence de l'épaisseur", l'influence de l'épaisseur sur la limite d'élasticité f_y et la résistance à la traction f_u est définie. Lorsque vous introduisez un nouveau matériau défini par l'utilisateur dans SCIA Engineer, l'influence de l'épaisseur peut aussi être introduite pour ce matériau :



Exemple: NA_Material_Strength_Application.esa

Dans cet exemple, un matériau de l'Annexe Nationale Belge a été introduit manuellement : S 275 J2. Ce matériau a plusieurs valeurs de résistance selon l'intervalle d'épaisseur :

	Lower limit [mm]	Condition	Upper limit [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

Buttons: Test data, OK, Cancel

Pour chaque poutre, la limite d'élasticité est prise en compte selon les valeurs introduites ci-dessus :

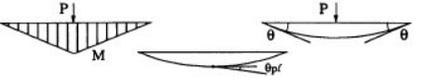
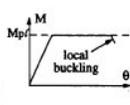
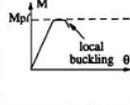
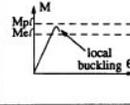
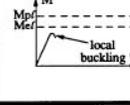
CS1	CS2	CS3	CS4																																																																																
<table border="1"> <tr><td>Formcode</td><td>1 - I sections</td></tr> <tr><td>h [mm]</td><td>80,00</td></tr> <tr><td>b [mm]</td><td>46,00</td></tr> <tr><td>t [mm]</td><td>5,20</td></tr> <tr><td>s [mm]</td><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>	Formcode	1 - I sections	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	<table border="1"> <tr><td>Formcode</td><td>1 - I sections</td></tr> <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>	Formcode	1 - I sections	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	<table border="1"> <tr><td>Formcode</td><td>1 - I sections</td></tr> <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>	Formcode	1 - I sections	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	<table border="1"> <tr><td>Formcode</td><td>1 - I sections</td></tr> <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>	Formcode	1 - I sections	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
Formcode	1 - I sections																																																																																		
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																																																																																		
Formcode	1 - I sections																																																																																		
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																																																																																		
Formcode	1 - I sections																																																																																		
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																																																																																		
Formcode	1 - I sections																																																																																		
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"> <tr><td colspan="2">Material data</td></tr> <tr><td>yield strength fy</td><td>275.0 MPa</td></tr> <tr><td>tension strength fu</td><td>430.0 MPa</td></tr> <tr><td>fabrication</td><td>rolled</td></tr> </table>	Material data		yield strength fy	275.0 MPa	tension strength fu	430.0 MPa	fabrication	rolled	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Material data</td></tr> <tr><td>yield strength fy</td><td>265.0 MPa</td></tr> <tr><td>tension strength fu</td><td>430.0 MPa</td></tr> <tr><td>fabrication</td><td>rolled</td></tr> </table>	Material data		yield strength fy	265.0 MPa	tension strength fu	430.0 MPa	fabrication	rolled	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Material data</td></tr> <tr><td>yield strength fy</td><td>205.0 MPa</td></tr> <tr><td>tension strength fu</td><td>430.0 MPa</td></tr> <tr><td>fabrication</td><td>rolled</td></tr> </table>	Material data		yield strength fy	205.0 MPa	tension strength fu	430.0 MPa	fabrication	rolled	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Material data</td></tr> <tr><td>yield strength fy</td><td>195.0 MPa</td></tr> <tr><td>tension strength fu</td><td>430.0 MPa</td></tr> <tr><td>fabrication</td><td>rolled</td></tr> </table>	Material data		yield strength fy	195.0 MPa	tension strength fu	430.0 MPa	fabrication	rolled																																																
Material data																																																																																			
yield strength fy	275.0 MPa																																																																																		
tension strength fu	430.0 MPa																																																																																		
fabrication	rolled																																																																																		
Material data																																																																																			
yield strength fy	265.0 MPa																																																																																		
tension strength fu	430.0 MPa																																																																																		
fabrication	rolled																																																																																		
Material data																																																																																			
yield strength fy	205.0 MPa																																																																																		
tension strength fu	430.0 MPa																																																																																		
fabrication	rolled																																																																																		
Material data																																																																																			
yield strength fy	195.0 MPa																																																																																		
tension strength fu	430.0 MPa																																																																																		
fabrication	rolled																																																																																		

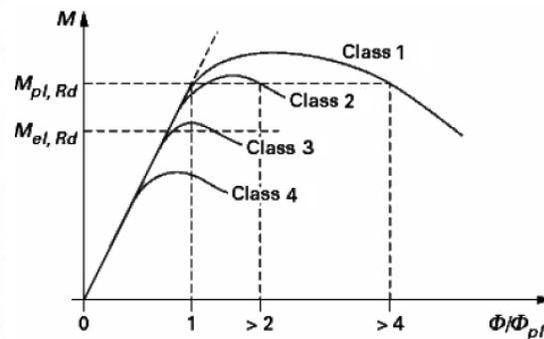
Classification de section

La classification est exécutée suivant l'EN 1993-1-1, art. 5.5.

Quatre classes de sections droites sont définies :

- **Classe 1** section (EC3, NEN) ou PL-PL (DIN)
Sections qui peuvent développer une rotule plastique avec la capacité de rotation requise pour l'analyse plastique
- **Classe 2** section (EC3, NEN) ou EL-PL (DIN)
Sections qui peuvent développer leur moment plastique de résistance mais qui ont une capacité de rotation limitée.
- **Classe 3** section (EC3, NEN) ou EL-EL (DIN)
Sections dans lesquelles la contrainte calculée dans la fibre de compression extrême de l'élément en acier peut atteindre sa limite d'élasticité mais le flambement local est susceptible d'empêcher le développement du moment plastique de résistance.
- **Classe 4** section (EC3, NEN) ou Section mince
Sections dans lesquelles il est nécessaire de permettre explicitement les effets du flambement local lors de la détermination du moment de résistance ou de la résistance à la compression.

Definition of the classification of cross-section				
				Global analysis of structures
Class	Behaviour model	Design resistance	Available rotation capacity of plastic hinge	
1		PLASTIC across full section 	important	elastic or plastic
2		PLASTIC across full section 	limited	elastic or plastic (if required rotation capacities are calculated and satisfied)
3		ELASTIC across full section 	none	elastic
4		ELASTIC across effective section 	none	elastic



La classification dépend des proportions de chaque élément de compression.

Pour chaque section intermédiaire, la classification est déterminée et le contrôle de section correspondant est exécuté. La classification peut être différente pour chaque point intermédiaire.

Pour chaque cas de charge/comboinaison, la section de classification critique le long de l'élément est utilisée pour exécuter le contrôle de stabilité. La classification de stabilité peut être différente pour chaque cas de charge/comboinaison. Cependant, pour les sections non prismatiques, la classification de stabilité est déterminée pour chaque section intermédiaire.

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

Table 5.2 (sheet 1 of 3): Maximum width-to-thickness ratios for compression parts

Internal compression parts						
				Axis of bending		
Class	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and compression			
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ when $\psi \leq -1^{*)}$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ applies where either the compression stress $\sigma \leq f_y$, or the tensile strain $\varepsilon_y > f_y/E$

Table 5.2 (sheet 2 of 3): Maximum width-to-thickness ratios for compression parts

Outstand flanges						
		Rolled sections		Welded sections		
Class	Part subject to compression	Part subject to bending and compression				
		Tip in compression		Tip in tension		
Stress distribution in parts (compression positive)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ For k_σ see 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

Table 5.2 (sheet 3 of 3): Maximum width-to-thickness ratios for compression parts

Angles						
Refer also to "Outstand flanges" (see sheet 2 of 3)					Does not apply to angles in continuous contact with other components	
Class	Section in compression					
Stress distribution across section (compression positive)						
3	$h/t \leq 15\epsilon; \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$					
Tubular sections						
Class	Section in bending and/or compression					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
NOTE For $d/t > 90\epsilon^2$ see 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

Si le résultat de cette classification est un profilé de classe 4, la section droite effective sera calculée selon l'EN 1993-1-5.

Pour chaque cas de charge et combinaison, les propriétés efficaces les plus critiques sont enregistrées :

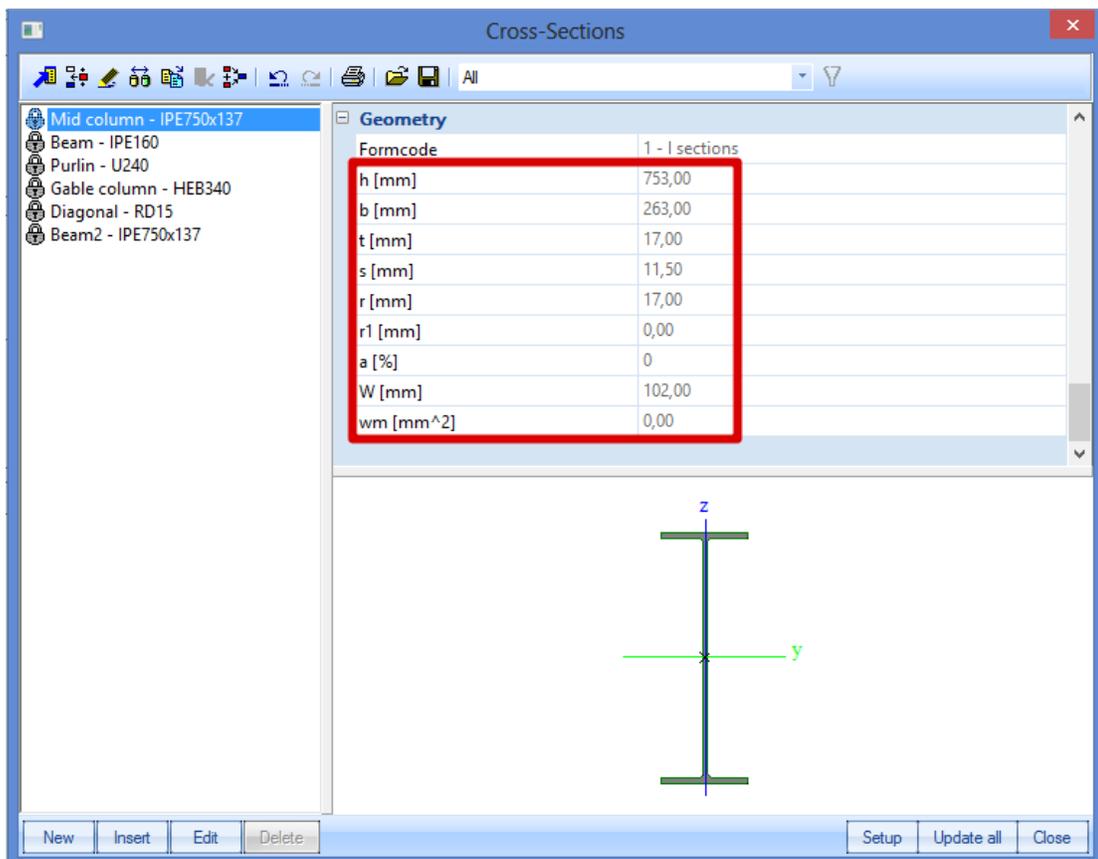
- A_{eff} est l'aire efficace de la section droite lorsqu'elle est soumise de la compression uniforme.
- W_{eff} est le module efficace de la section droite lorsqu'elle est soumise uniquement à un moment autour de l'axe.
- e_N est le décalage de l'axe de gravité lorsque la section droite est soumise a de la compression uniforme.

Avec ces propriétés critiques, le contrôle acier est exécuté.

Exemple: Industrial Hall.esa

Dans cet exemple, la classification sera faite pour un profilé IPE750x137, ce qui donnera une section droite de classe 4. Ensuite, le calcul de la forme efficace selon l' EN 1993-1-5 sera donné.

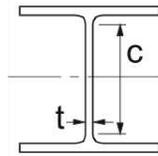
Considérons le poteau B28



La classification a été exécutée en bas du poteau (position = 0.00m)

Sur cette position, un appui articulé a été introduit, sur cette position le poteau n'est pas soumis à la flexion.

Tableau 5.2 (feuille 1):



$c = H - 2 * \text{épaisseur de semelle} - 2 * \text{rayon}$
 $c = 753\text{mm} - 2 \times 17\text{mm} - 2 \times 17\text{mm} = 685\text{mm}$
 $t = 11,5 \text{ mm}$
 $c/t = 59,57$

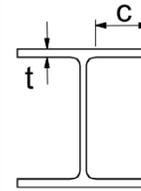
Class	Part subject to bending	Part subject to compression
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$

Avec $\epsilon = \sqrt{235/f_y} = 1$

Ratio maximum de la classe 1: 33
 Ratio maximum de la classe 2: 38
 Ratio maximum de la classe 3: 42

$c/t = 59.57 > 42 \Rightarrow$ Classe 4

Tableau 5.2 (feuille 2):



$c = B/2 - \text{épaisseur d'âme}/2 - \text{rayon}$
 $c = 263\text{mm}/2 - 11,5\text{mm}/2 - 17 = 109$
 $t = 17 \text{ mm}$
 $c/t = 6,40$

Class	Part subject to compression
1	$c/t \leq 9\epsilon$
2	$c/t \leq 10\epsilon$
3	$c/t \leq 14\epsilon$

Avec $\epsilon = \sqrt{235/f_y} = 1$

Ratio maximum de la classe 1: 9
 Ratio maximum de la classe 2: 10
 Ratio maximum de la classe 3: 14

$c/t = 6.40 < 9 \Rightarrow$ Classe 1

Dans SCIA Engineer:

Classification for member buckling design
 Decisive position for stability classification: 0,000 m
Classification of Internal Compression parts
 According to EN 1993-1-1 Table 5.2 Sheet 1

Maximum width-to-thickness ratio	59,57
Class 1 Limit	33,00
Class 2 Limit	38,00
Class 3 Limit	42,00

=> Internal Compression parts **Class 4**

Classification of Outstand Flanges
 According to EN 1993-1-1 Table 5.2 Sheet 2

Maximum width-to-thickness ratio	6,40
Class 1 Limit	9,00
Class 2 Limit	10,00
Class 3 Limit	14,00

=> Outstand Flanges **Class 1**

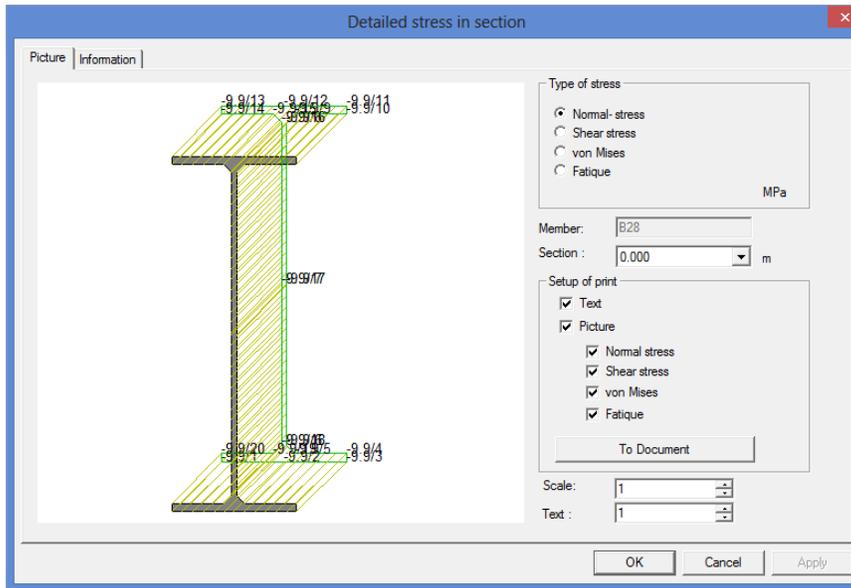
=> Section classified as **Class 4** for member buckling design

Cette section droite a une classification : classe 4, les propriétés efficaces doivent donc être calculées. Ces propriétés sont aussi données dans SCIA Engineer dans l'aperçu du contrôle acier, juste en dessous du titre "CONTROLE DE STABILITE".

Properties					
sectional area A eff	1.5269e+04	mm ²	Vz eff	6.3269e+03	mm ²
Shear area Vy eff	8.9420e+03	mm ²	iz eff	58.15	mm
radius of gyration iy eff	320.39	mm	lz eff	5.1634e+07	mm ⁴
moment of inertia ly eff	1.5674e+09	mm ⁴	Wz eff	3.9265e+05	mm ³
elastic section modulus Wy eff	4.1630e+06	mm ³	enz	0.00	mm
Eccentricity eny	0.00	mm			

Le calcul de l'aire A_{eff} est donné ci-dessous.

Dans cette section, il y a une force de compression uniforme le long de l'âme :



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 Table 4.1, la situation de compression uniforme sera utilisée dans cet exemple :

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

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

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

$$\bar{\lambda}_p = [f_y / \sigma_{cr}]^{0,5} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

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

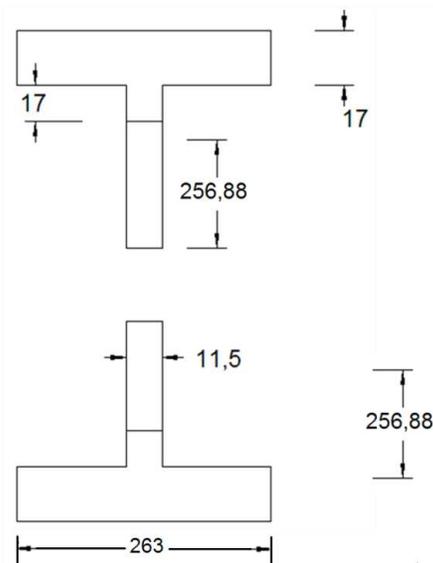
$$k_\sigma = 4,0 \text{ (Table 4.1 of EN 1993-1-5:2006)}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{59,57}{28,4 \cdot 1,00 \cdot \sqrt{4,0}} = 1,05$$

$$\rho = \frac{1,05 - 0,22}{(1,05)^2} = 0,75$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{\text{eff}} = 0,5 \cdot \rho \cdot \bar{b} = 0,5 \cdot 0,75 \cdot 685 \text{ mm} = 256,88 \text{ mm}$$

$$A_{\text{eff}} = [263 \cdot 17 + 256,88 \cdot 11,5 + 17 \cdot 11,5] \cdot 2 = 15152 \text{ mm}^2$$

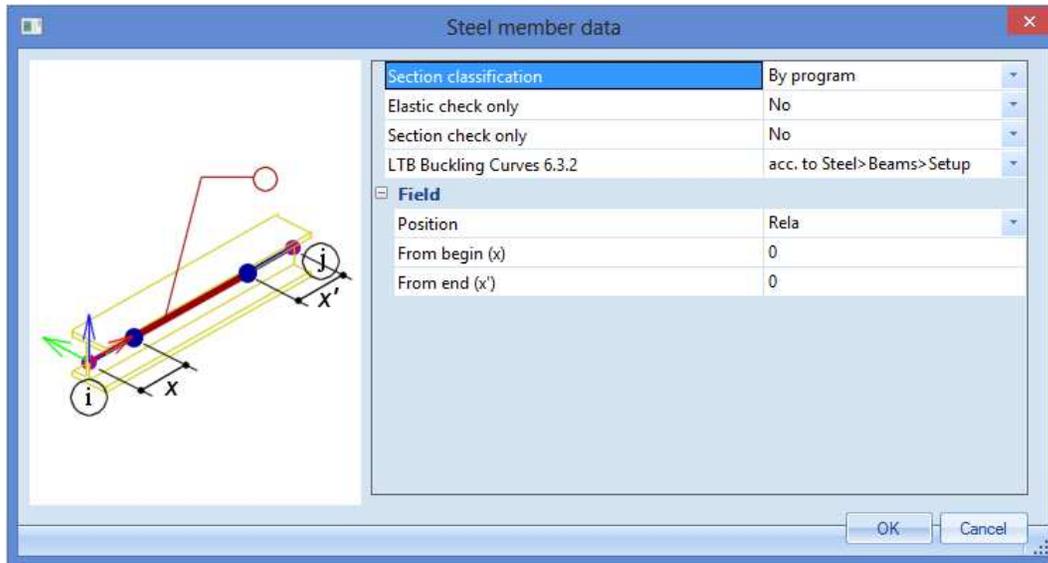


Dans ce calcul, les arrondis aux angles entre les ailes et l'âme ne sont pas pris en compte. Le résultat dans SCIA Engineer sera donc un peu plus grand :

Properties					
sectional area A eff	1.5269e+04	mm ²			
Shear area Vy eff	8.9420e+03	mm ²	Vz eff	6.3269e+03	mm ²
radius of gyration iy eff	320.39	mm	iz eff	58.15	mm
moment of inertia ly eff	1.5674e+09	mm ⁴	lz eff	5.1634e+07	mm ⁴
elastic section modulus Wy eff	4.1630e+06	mm ³	Wz eff	3.9265e+05	mm ³
Eccentricity eny	0.00	mm	enz	0.00	mm

Les autres propriétés de cette section efficace peuvent aussi être calculées.

La classification calculée dans SCIA Engineer peut être modifiée par 2 configurations dans les **Données de barre acier** :



Classification de section

L'utilisateur peut choisir une classification calculée **par le programme** ou la modifier en choisissant l'une des classes 1, 2 ou 3. Puisque la classification 4 n'est pas décrite pour toutes les sections droites dans les Eurocodes, cette option ne peut pas être choisie.

Contrôle Élastique Seul

L'utilisateur peut choisir d'exécuter un contrôle élastique. Cela correspond à un contrôle de classe 3.

Classification dans SCIA Engineer

Les classes suivantes sont possible par profilé type dans SCIA Engineer :

Section	Classification	Classe 1	Classe2	Classe3	Classe 4	Contrôle de gauchissement Classe 1 & 2	Contrôle de gauchissement Classe 3
I	x	x	x	x	x	x	x
RHS	x	x	x	x	x		
CHS	x	x	x	x			
L	x			x			
U	x			x	x		x
T	x			x			
PPL	x			x	x		x
RS	x			x			
Z	=3			x			
O	=3			x			
Σ	x			x	x		x
NUM	=3			x			
COM	=3			x			

Dans le chapitre "Sections Droites" une explication est donnée sur quelles sections sont reconnues sous quelle type de forme (I, RHS, L, CHS, ...).

Contrôle de section à l'ELU

Dans ce chapitre, les coefficients de sécurité partiels sont débord expliqués et ensuite une courte explication de tous les contrôles de section est donnée.

Le contrôle de section peut être trouvé dans SCIA Engineer sous "Acier -> Barres -> Contrôle ELU -> Contrôle". Dans ce menu, l'utilisateur peut choisir d'afficher la sortie "Bref" et ou la sortie "Détaillé".

Avec la sortie brève, les résultats sont présentés en une seule ligne.

Avec la sortie détaillée, les résultats du contrôle unité sont montrés en incluant une référence aux formules utilisées dans l'EN 1993-1-1 pour chaque contrôle.

Le Contrôle en Section sera expliqué ci-dessous et les résultats détaillés sont montrés.

Coefficients partiels de sécurité

Les coefficients de sécurité partiels sont pris de l'EN 1993-1-1 art. 6.1.

Et les coefficients de sécurité suivants sont pris en compte :

$\gamma_{M0} = 1,00$	Résistance de la section droite
$\gamma_{M1} = 1,00$	Résistance des éléments à l'instabilité
$\gamma_{M0} = 1,25$	Resistance à la fracture de la section droite en tension

Ces coefficients peuvent aussi être trouvés dans l'**Annexe Nationale** de l'EN 1993-1-1 dans SCIA Engineer :



Traction

Le contrôle de traction sera exécuté selon l'EN 1993-1-1 art. 6.2.3.

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

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}: \text{ la résistance plastique de dimensionnement de la section droite}$$

Exemple: Industrial Hall.esa

Considérons le contreventement B234 (pour le cas de charge 3DWind1). Dans ce cas de charge le contreventement est en tension :

$$N_{t,Rd} = \frac{1,7663 \cdot 10^2 \text{mm}^2 \cdot 235 \text{MPa}}{1.0} = 41,51 \text{kN}$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{32,32 \text{kN}}{41,51 \text{kN}} = 0,78$$

Internal forces	Calculated	Unit
N,Ed	29,77	kN
Vy,Ed	0,00	kN
Vz,Ed	0,00	kN
T,Ed	0,00	kNm
My,Ed	0,00	kNm
Mz,Ed	0,00	kNm

Tension check

According to EN 1993-1-1 article 6.2.3 and formula (6.5)

A	1,7663e+02	mm ²
Npl,Rd	41,51	kN
Nu,Rd	45,78	kN
Nt,Rd	41,51	kN
Unity check	0,72	-

Compression

Le contrôle de compression sera exécuté selon l'EN 1993-1-1 art. 6.2.4.

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

Où

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

$$- N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{Pour les sections droites de classe 4}$$

Exemple: Industrial Hall.esa

Considérons le poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

The critical check is on position 2.875 m

Internal forces	Calculated	Unit
N,Ed	-156,72	kN
Vy,Ed	-0,04	kN
Vz,Ed	-101,11	kN
T,Ed	0,00	kNm
My,Ed	-290,68	kNm
Mz,Ed	-0,10	kNm

La classification sur cette position est Classe 1 (poteau soumis à de la compression et de la flexion).

$$N_{c,Rd} = \frac{1,7500 \cdot 10^4 \text{mm}^2 \cdot 235 \text{MPa}}{1.0} = 4112,5 \text{kN}$$

$$\text{Contrôle unité} = \frac{161.00\text{kN}}{4112.5\text{kN}} = 0,04$$

Compression check

According to EN 1993-1-1 article 6.2.4 and formula (6.9)

A	1,7500e+04	mm ²
N _{c,Rd}	4112,50	kN
Unity check	0,04	-

Moment de flexionLe contrôle de moment de flexion pour My et Mz sera exécuté suivant l'EN 1993-1-1 **art. 6.2.5**.

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

Où :

- $M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ Pour les sections droites de classe 1 ou 2
- $M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ Pour les sections de classe 3
- $M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ Pour les sections de classe 4

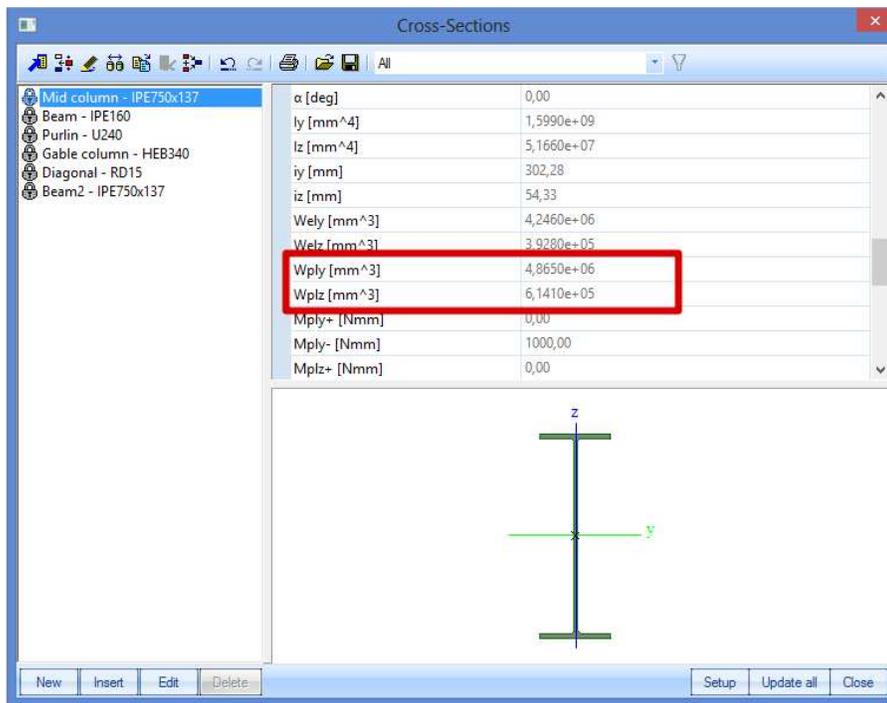
Exemple: Industrial Hall.esa

Considérons le poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

The critical check is on position 2.875 m

Internal forces	Calculated	Unit
N _{,Ed}	-156,72	kN
V _{y,Ed}	-0,04	kN
V _{z,Ed}	-101,11	kN
T _{,Ed}	0,00	kNm
M _{y,Ed}	-290,68	kNm
M _{z,Ed}	-0,10	kNm

La classification sur cette position est la Classe 1 (poteau sous compression et flexion).



$$M_{y,c,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4.865 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \cdot 235 \text{ MPa}}{1.0} = 1,14328 \cdot 10^9 \text{ Nmm} = 1143,28 \text{ kNm}$$

$$M_{z,c,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6.141 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \cdot 235 \text{ MPa}}{1.0} = 1,4431 \cdot 10^8 \text{ Nmm} = 144,31 \text{ kNm}$$

$$\text{Contrôle Unité } M_y = \frac{300,30 \text{ kNm}}{1143,28 \text{ kNm}} = 0,26$$

$$\text{Contrôle Unité } M_z = \frac{0,13 \text{ kNm}}{144,31 \text{ kNm}} = 0,00$$

Bending moment check for My

According to EN 1993-1-1 article 6.2.5 and formula (6.12),(6.13)

Wpl,y	4,8650e+06	mm^3
Mpl,y,Rd	1143,28	kNm
Unity check	0,25	-

Bending moment check for Mz

According to EN 1993-1-1 article 6.2.5 and formula (6.12),(6.13)

Wpl,z	6,1410e+05	mm^3
Mpl,z,Rd	144,31	kNm
Unity check	0,00	-

Cisaillement

Le contrôle de cisaillement pour Vy et Vz sera exécuté selon l'EN 1993-1-1 art. 6.2.6.

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

Pour la **conception plastique** $V_{c,Rd}$ est la résistance plastique au cisaillement $V_{pl,Rd}$:

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

Avec :

A_v : l'aire de cisaillement.

La formule utilisée pour le calcul de A_v dépend de la section droite (voir l'EN 1993-1-1 article 6.2.6(3)).

Pour la **conception élastique** $V_{c,Rd}$ est la résistance élastique au cisaillement. Le critère suivant pour un point critique de la section droite peut être utilisé à moins que la vérification du flambement selon la section 5 de l'EN 1993-1-5 soit applicable :

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

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

Lorsque la force de cisaillement est combinée avec un moment de torsion, la résistance plastique $V_{pl,Rd}$ doit être réduite comme spécifié dans le paragraphe suivant.

Exemple: Industrial Hall.esa

Considérons le poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

The critical check is on position 2.875 m

Internal forces	Calculated	Unit
N_{Ed}	-156,72	kN
$V_{y,Ed}$	-0,04	kN
$V_{z,Ed}$	-101,11	kN
T_{Ed}	0,00	kNm
$M_{y,Ed}$	-290,68	kNm
$M_{z,Ed}$	-0,10	kNm

La classification sur cette position est la Classe 1 (poteau soumis à de la compression et flexion).

Shear check for V_y

According to EN 1993-1-1 article 6.2.6 and formula (6.17)

Eta	1,20	
A_v	9,2698e+03	mm ²
$V_{pl,y,Rd}$	1257,69	kN
Unity check	0,00	-

Shear check for V_z

According to EN 1993-1-1 article 6.2.6 and formula (6.17)

Eta	1,20	
A_v	9,9222e+03	mm ²
$V_{pl,z,Rd}$	1346,22	kN
Unity check	0,08	-

Torsion

EN 1993-1-1 article 6.2.7.

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

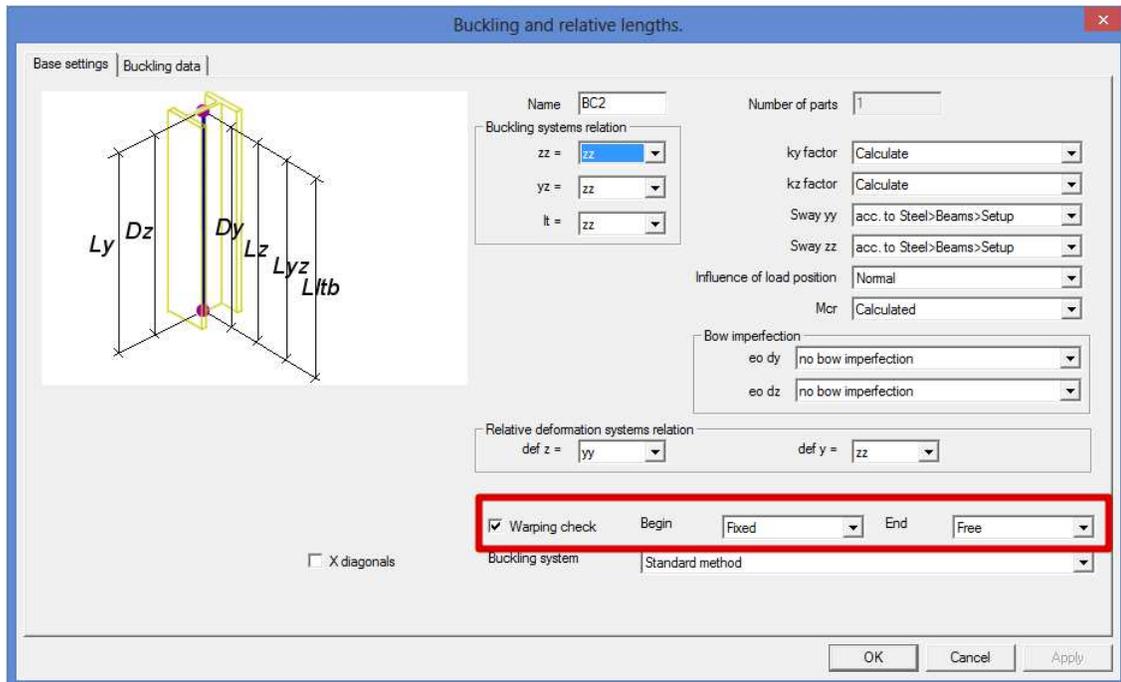
Où T_{Rd} est la résistance à la torsion de la section droite.

T_{Ed} doit être considéré comme la somme de deux effets internes :

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

Où $T_{t,Ed}$ est la torsion de St. Venant
 $T_{w,Ed}$ est la torsion de gauchissement

SCIA Engineer va automatiquement prendre en compte la torsion de St. Venant. Si l'utilisateur veut aussi faire le calcul avec la **torsion de gauchissement**, cette option doit être activée dans "Flambement et longueurs relatives" de cette barre :



Le bouton **Contrôle de gauchissement** devrait être activé pour le début et la fin de la poutre, l'utilisateur doit indiquer si cette extrémité est Fixe ou Libre pour le gauchissement.

Exemple: Warping.esa

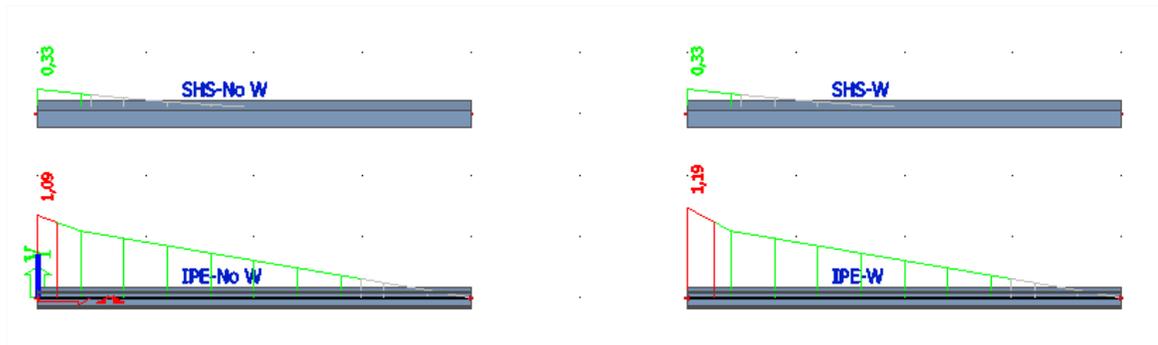
Comme cité dans l'EN 1993-1-1, art. 6.2.7(7), pour les sections creuses fermées, les effets de la torsion de gauchissement peuvent être négligés et dans le cas d'un élément avec une section droite ouverte, comme un I ou H, les effets de la torsion de St.Venant peuvent être négligés.

Dans cet exemple 4 poutres sont introduites :

- IPE 180 – Pas de Gauchissement activé
- SHS 180/180/10.0 – Pas de gauchissement activé
- IPE 180 – Gauchissement activé dans les données de flambement
- SHS 180/180/10.0 – Gauchissement activé dans les données de flambement

Sur toutes les poutres, une force linéaire de -4kN est introduit avec une excentricité e_{dy} de 0.05 m. Le facteur k est fixé égal à 2 dans les données de flambement.

Buckling and relative lengths.												
Base settings		Buckling data										
	yy	ky	Sway yy	eo dy [mm]	zz	kz	Sway zz	eo dz [mm]	kyz	klz	k	kw
1	<input checked="" type="checkbox"/> Fixed		acc. to B		<input checked="" type="checkbox"/> Fixed		acc. to B		1,00	1,00	2,00	1,00
2	<input type="checkbox"/> Free				<input type="checkbox"/> Free							



Pour les **profilés SHS**, il n'y a pas de différence entre l'option "Gauchissement" activée ou non. Cela était prévisible puisque le gauchissement peut être négligé pour les sections creuses fermées.

Pour les **profilés IPE**, la torsion de gauchissement ne peut pas être négligée. Lorsque cela est donc activé, il y a une grande influence sur la valeur de résistance pour la torsion :

Contrôle de Torsion IPE 180 sans gauchissement activé :

Torsion check

According to EN 1993-1-1 article 6.2.7 and formula (6.23)

Tau,t,Ed	133,6	MPa
Tau,Rd	135,7	MPa
Unity check	0,98	-

Combined Shear and Torsion check for Vz and Tau,t,Rd

According to EN 1993-1-1 article 6.2.6 & 6.2.7 and formula (6.25),(6.26)

Vpl,T,z,Rd	70,02	kN
Unity check	0,23	-

Contrôle de Torsion IPE 180 avec gauchissement activé :

Torsion check

According to EN 1993-1-1 article 6.2.7 and formula (6.23)

Tau,t,Ed	133,6	MPa
Tau,Rd	135,7	MPa
Unity check	0,98	-

Combined Shear and Torsion check for Vz and Tau,t,Rd

According to EN 1993-1-1 article 6.2.6 & 6.2.7 and formula (6.25),(6.26)

Vpl,T,z,Rd	70,02	kN
Unity check	0,23	-

Combined bending, axial force and shear force check

According to EN 1993-1-1 article 6.2.7

According to I. Vayas, Stahlbau 69 (2000)

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

Warping conditions at the extremities of the buckling system

Extremity	Condition
Begin	Fixed
End	Free

Decomposition of torsional moment

x [m]	M _{xp,Ed} [kNm]	M _{xs,Ed} [kNm]	M _{w,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

Internal forces			
St. Venant torsion	M _{xp,Ed}	0,00	kNm
Warping torsion	M _{xs,Ed}	0,80	kNm
Bimoment	M _{w,Ed}	-0,43	kNm ²

Force ratios		
Cross-section flange quotient	alpha,f	0,61
Cross-section web quotient	alpha,w	0,39
Normal force ratio	n	0,00
Moment ratio for My	my	-0,82
Moment ratio for Mz	mz	0,00
Shear ratio for Vy	vy	0,00
Shear ratio for Vz	vz	0,12
Moment ratio for Mw	mw	0,61
Moment ratio for Mxp	mxp	0,00
Moment ratio for Mxs	mxs	0,05

Influence factors		
Interaction ratio for shear stresses in flanges	beta,y	0,05
Reduction factor for shear stresses in flanges	pf	0,00
Yield strength reduction for shear stresses in flanges	sf	1,00
Interaction ratio for shear stresses in web	beta,z	0,12
Reduction factor for shear stresses in web	pw	0,00
Yield strength reduction for shear stresses in web	sw	1,00
Additional moment coefficient	lambda,s	0,00
Additional moment coefficient	delta	0,00

Unity checks		
Unity check (42)	1,19	-

Dans ce cas, la différence entre l'option "gauchissement" activée ou par, donne une grande différence dans le contrôle unité.

Les **propriétés de torsion des sections droites** ne sont pas correctement calculées dans plusieurs cas.

L'exemple suivant donne une explication concernant ce calcul.

Exemple: Torsion.esa

Dans cet exemple, deux poutres sont introduites avec les mêmes propriétés, seules les propriétés de torsion de la section sont différentes :

CS1

L'option "Analyse EF" n'est pas activée :

Fibres and Parts	
Fibre text zoom	1.0
Edit named items	
2D FEM analysis	
Use 2D FEM analysis	<input type="checkbox"/>

La valeur pour I_t sera calculée avec une formule générale qui donne seulement une estimation de I_t mais pas une valeur correcte. La valeur pour I_w ne sera pas calculée et I_w sera prise égale à 0.00 mm^6 .

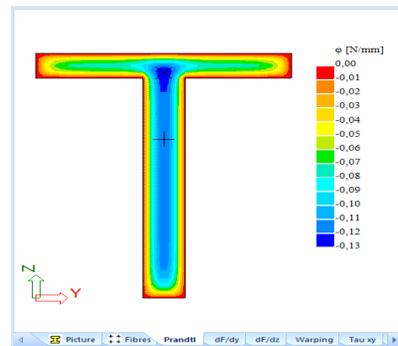
Property	
A [mm^2]	7,5000e+03
Ay [mm^2]	7,5000e+03
Az [mm^2]	7,5000e+03
AL [m^2/m]	7,0000e-01
AD [m^2/m]	7,0000e-01
cYUCS [mm]	13
cZUCS [mm]	130
α [deg]	0,00
ly [mm^4]	3,0250e+07
lz [mm^4]	5,8594e+06
iy [mm]	64
iz [mm]	28
Wely [mm^3]	2,3269e+05
Welz [mm^3]	7,8125e+04
Wply [mm^3]	4,1250e+05
Wplz [mm^3]	1,4063e+05
Mply+ [Nmm]	0,00
Mply- [Nmm]	0,00
Mplz+ [Nmm]	0,00
Mplz- [Nmm]	0,00
dy [mm]	0
dz [mm]	0
I_t [mm^4]	2,5672e+06
I_w [mm^6]	0,0000e+00
β_y [mm]	0
β_z [mm]	0

CS2

L'option "Analyse EF" est activée :

Fibres and Parts	
Fibre text zoom	1.0
Edit named items	
2D FEM analysis	
Use 2D FEM analysis	<input checked="" type="checkbox"/>
Mesh size [mm]	0
Min. point distance [mm]	0
Shear area Ay	With τ_{xz}
Shear area Az	With τ_{xy}

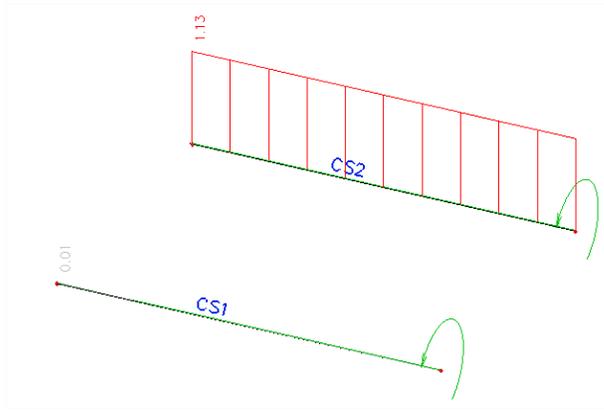
La valeur pour I_t et I_w est sera donc calculée avec une méthode d'analyse EF :



Property	
A [mm^2]	7,5000e+03
Ay [mm^2]	3,7071e+03
Az [mm^2]	4,4171e+03
AL [m^2/m]	7,0000e-01
AD [m^2/m]	7,0000e-01
cYUCS [mm]	75
cZUCS [mm]	130
α [deg]	0,00
ly [mm^4]	3,0250e+07
lz [mm^4]	5,8594e+06
iy [mm]	64
iz [mm]	28
Wely [mm^3]	2,3269e+05
Welz [mm^3]	7,8125e+04
Wply [mm^3]	4,1250e+05
Wplz [mm^3]	1,4063e+05
Mply+ [Nmm]	96937500,00
Mply- [Nmm]	96937500,00
Mplz+ [Nmm]	33046875,00
Mplz- [Nmm]	33046875,00
dy [mm]	0
dz [mm]	54
I_t [mm^4]	1,3076e+06
I_w [mm^6]	2,8054e+09
β_y [mm]	-134
β_z [mm]	0

Sur les deux poutres, un moment de torsion (8 kNm) a été introduit ainsi qu'une petite charge linéaire (-0.1 kN/m).

Cela donne le Contrôle de Section suivant :



La différence dans les résultats est dans le contrôle de torsion. Le contrôle de torsion ne peut pas être exécuté pour la première poutre puisqu'aucun résultat pour la rigidité de torsion ne peut être trouvé.

Pour la **poutre B2** (CS2) le contrôle de torsion peut être exécuté :

The critical check is on position 0.000 m

Internal forces	Calculated	Unit
N,Ed	0,00	kN
Vy,Ed	0,00	kN
Vz,Ed	0,40	kN
T,Ed	-8,00	kNm
My,Ed	-0,80	kNm
Mz,Ed	0,00	kNm

Torsion check

According to EN 1993-1-1 article 6.2.7 and formula (6.23)

Tau,t,Ed	153,0	MPa
Tau,Rd	135,7	MPa
Unity check	1,13	-

Contrôle d'interaction : Flexion, cisaillement et force axiale

Ce contrôle sera exécuté selon l'EN 1993-1-1 **articles 6.2.8 – 6.2.9 -6.2.10.**

Pour la flexion biaxiale, le critère suivant peut être utilisé :

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

Où α et β sont définis comme suit :

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

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

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

Les valeurs $M_{N,y,Rd}$ et $M_{N,z,Rd}$ dépendent du moment de résistance, réduit par un coefficient qui dépend de "n", le contrôle de l'effort normal :

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

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

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

Si $V_{Ed} \geq 0,5 V_{pl,T,Rd}$

La limite d'élasticité sera réduite par un coefficient ρ .

$$(1-\rho)f_y$$

Où

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

Et

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

Lorsque la torsion est présente ρ doit être obtenu à partir de

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

Sections de Classe 3

EN 1993-1-1 **article 6.2.9.2.**

Lorsqu'il n'y a pas de force de cisaillement, pour les sections de Classe 3 la contrainte longitudinale max doit satisfaire le critère suivant :

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

Sections de Classe 4

EN 1993-1-1 **article 6.2.9.3.**

Lorsqu'il n'y a pas de force de cisaillement, pour les sections de Classe 4 la contrainte longitudinale max doit satisfaire le critère :

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

Le critère suivant doit être satisfait :

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

Où A_{eff} est l'aire efficace de la section droite lorsqu'elle est soumise à de la compression uniforme

$W_{eff,min}$ est le module de la section lorsqu'elle est soumise à un moment autour de l'axe approprié

e_N est le décalage de l'axe de gravité approprié lorsque la section droite est soumise à de la compression seule.

Exemple: Industrial hall.esa

Considérons le poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

Compression check

According to EN 1993-1-1 article 6.2.4 and formula (6.9)

A	1,7500e+04	mm ²
N _{c,Rd}	4112,50	kN
Unity check	0,04	-

⇒ n = 0,04

Shear check for V_y

According to EN 1993-1-1 article 6.2.6 and formula (6.17)

Eta	1,20	
Av	9,2698e+03	mm ²
V _{pl,y,Rd}	1257,69	kN
Unity check	0,00	-

Shear check for V_z

According to EN 1993-1-1 article 6.2.6 and formula (6.17)

Eta	1,20	
Av	9,9222e+03	mm ²
V _{pl,z,Rd}	1346,22	kN
Unity check	0,08	-

⇒ Le contrôle unité pour le cisaillement est inférieur à 0,5, il n'est pas nécessaire de réduire la limite d'élasticité pour le contrôle combiné.

Combined bending, axial force and shear force check

According to EN 1993-1-1 article 6.2.9.1 and formula (6.41)

M _{pl,y,Rd}	1143,28	kNm
Alpha	2,00	
M _{pl,z,Rd}	144,31	kNm
Beta	1,00	

Unity check (6.41) = 0,06 + 0,00 = 0,07 -

Note: Since the shear forces are less than half the plastic shear resistances their effect on the moment resistances is neglected.

Note: Since the axial force satisfies both criteria (6.33) and (6.34) of EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) its effect on the moment resistance about the y-y axis is neglected.

Note: Since the axial force satisfies criteria (6.35) of EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) its effect on the moment resistance about the z-z axis is neglected.

Contrôle de stabilité à l'ELU

Le contrôle de stabilité peut être trouvé dans SCIA Engineer sous "Acier -> Poutres -> contrôle ELU -> Contrôle". Dans ce menu, l'utilisateur peut choisir d'afficher la sortie "Brève" et ou la "sortie Détaillée".

Avec la sortie brève, les résultats sont affichés en une ligne.

Avec la sortie détaillée, les résultats des contrôles unité sont affichés en incluant une référence à la formule utilisée dans l'EN 1993-1-1 pour chaque contrôle.

Ci-dessous, le Contrôle de Section sera expliqué et les résultats détaillés sont affichés.

Certains contrôles de stabilité ne sont pas supportés pour certaines sections dans SCIA Engineer. Dans le tableau ci-dessous, un aperçu des contrôles possibles pour chaque section est donné :

Section	Flambement	Déversement	Flambement par cisaillement
I	x	x	x
RHS	x	x	
CHS	x	x	
L	x	(*2)	
U	x	(*2)	x
T	x	(*2)	
PPL	x	x	x
RS	x	(*2)	
Z	x	(*2)	
O	x	(*2)	
Σ	(*1)	(*2)	x
NUM	(*1)	(*2)	
COM	(*1)	(*2)	

(*1) Les courbes de flambement sont introduites manuellement par l'utilisateur

(*2) Formule générale pour M_{cr} – voir le chapitre 'Déversement'

Dans le chapitre "Sections droites" une explication est donnée sur quelles sections sont reconnues et sous quelle forme (I, RHS, L, CHS, ...).

Classification

Il y a une différence dans la section de classification dans le contrôle en Section et le contrôle de Stabilité :

Classification dans le contrôle en section :

Ici la classification est faite pour chaque section sur l'élément et ensuite le contrôle de section sera exécuté avec la classification et les efforts internes sur cette section.

Classification dans le Contrôle de Stabilité

Dans le contrôle de stabilité, la plus grande classification le long de l'élément est utilisée pour le contrôle de stabilité sur toutes les sections.

Lorsque le contrôle le plus élevé se trouve sur 2m à partir du début par exemple :

- Le contrôle en section va prendre en compte les efforts internes sur 2m à partir du début de la barre et exécuter une classification avec ces efforts internes.

- Le contrôle de stabilité va exécuter un contrôle avec les efforts internes à 2m à partir du début de la barre, mais pas avec la classification à cet endroit. Cette section a peut être le moment le plus grand en comparaison avec l'effort de compression. La classification peut résulter ici en une classe 1.

Mais au début de la barre, le moment de flexion est égal à zéro, la classification ici peut être de Classe 4. Le contrôle de stabilité va donc prendre les efforts internes de la section qui se trouve à 2m mais prendre en compte la classification Classe 4 (de 0m sur la barre).

Contrôle de Flambement

Le contrôle de flambement sera exécuté selon l'EN 1993-1-1 **art. 6.3.1**.

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

Où

- $N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$ Pour les sections de classe 1, 2 ou 3
- $N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$ Pour les sections de classe 4

Le coefficient de réduction χ sera calculé comme suit :

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{mais } \chi \leq 1,0$$

avec

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

$$\bar{\lambda} = \begin{cases} \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} & \text{Pour les sections de classe 1, 2 or 3} \\ \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} & \text{Pour les sections de classe 4} \end{cases}$$

N_{cr} Effort normal critique (Force d'Euler)

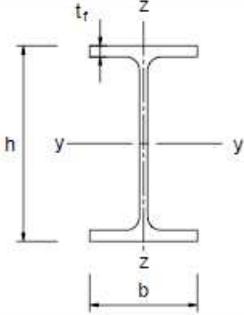
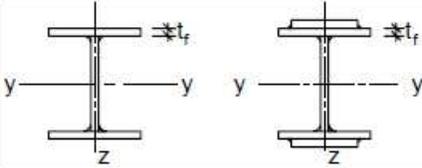
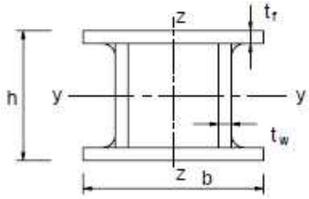
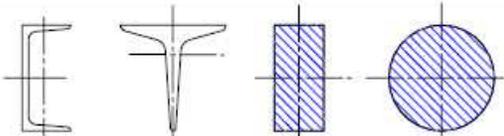
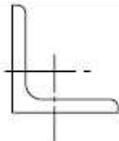
$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{k^2 L^2}$$

α Imperfection dépendant de la courbe de flambement :

Buckling curve	a_0	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

La sélection de la courbe de flambement pour une section droite est faite avec l'EN 1993-1-1, Tableau 6.2

Table 6.2: Selection of buckling curve for a cross-section

Cross section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Rolled sections 	$h/b > 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	a a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	b c
	$h/b \leq 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	b c
			$t_f > 100 \text{ mm}$	d c
Welded I-sections 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	
Hollow sections 	hot finished	any	a	
	cold formed	any	c	
Welded box sections 	generally (except as below)	any	b	
	thick welds: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	any	c	
U-, T- and solid sections 		any	c	
L-sections 		any	b	

Dans SCIA Engineer le calcul des coefficients de flambement k_y ou k_z peut être fait automatiquement ou peut être introduit par l'utilisateur.

Dans le paragraphe suivant le calcul des coefficients de Flambement est expliqué.

Exemple : Buckling Curves.esa

Dans le Tableau 6.2 les courbes de flambement générales sont données pour les profils les plus courants. Pour certains types de section droite, SCIA Engineer utilisera automatiquement ces courbes. Les sections droites concernées sont :

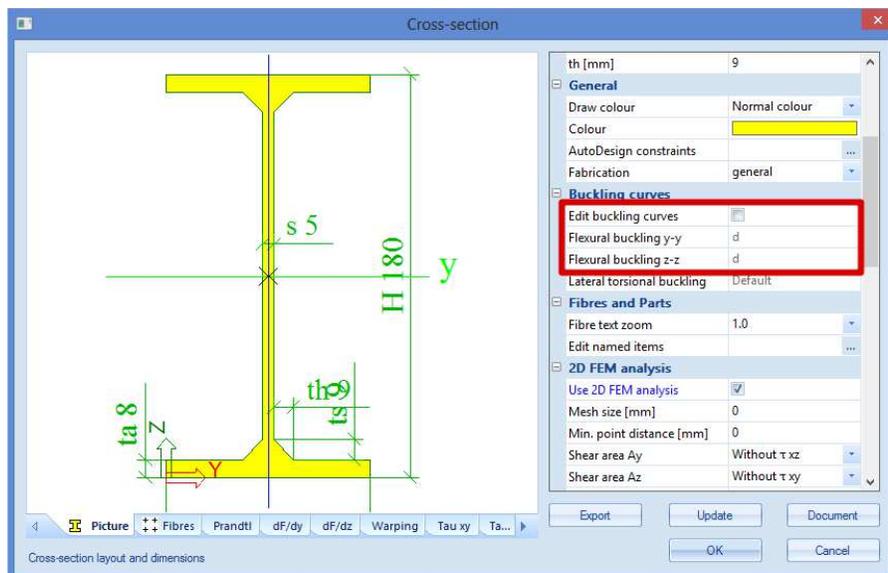
- Les profils de la bibliothèque

- Jarrets
- PRS
- Build-in beams
- Parois minces
- Fabriqué

Pour les autres types de sections droites, la courbe de flambement utilisée par défaut est la courbe d. Cela peut être modifié manuellement dans les propriétés de la section droite.

Dans cet exemple 2 poutres sont introduites avec 2 sections droites différentes :

- B1: CS1 – IPE 180:
 - o Courbe de flambement a pour y-y selon la norme
 - o Le contrôle de stabilité utilise la courbe a, selon la norme
- B2: CS2 – Section en I
 - o Section non-standard : pas de courbe de flambement selon la norme. La courbe de flambement d est utilisée par défaut.
 - o Le contrôle de stabilité utilise la courbe d



Coefficients de flambement

Méthode générale

Pour le calcul des coefficients de flambement par défaut, deux formules approximatives sont utilisées :

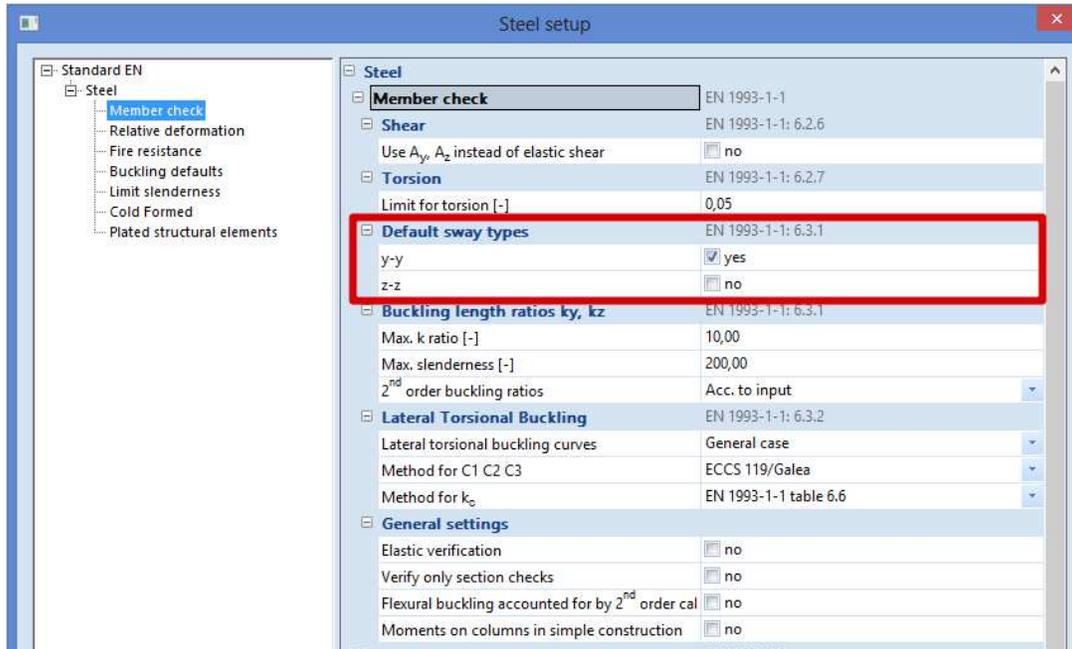
- une formule pour une structure contreventée (résultant en un coefficient de flambement inférieur (ou égal) à 1)
- une formule pour une structure non contreventée (résultant en un coefficient de flambement supérieur (ou égal) à 1).

Il est donc important pour cette méthode que l'utilisateur choisisse l'option correcte contreventé ou non contreventé pour les deux directions locales :

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

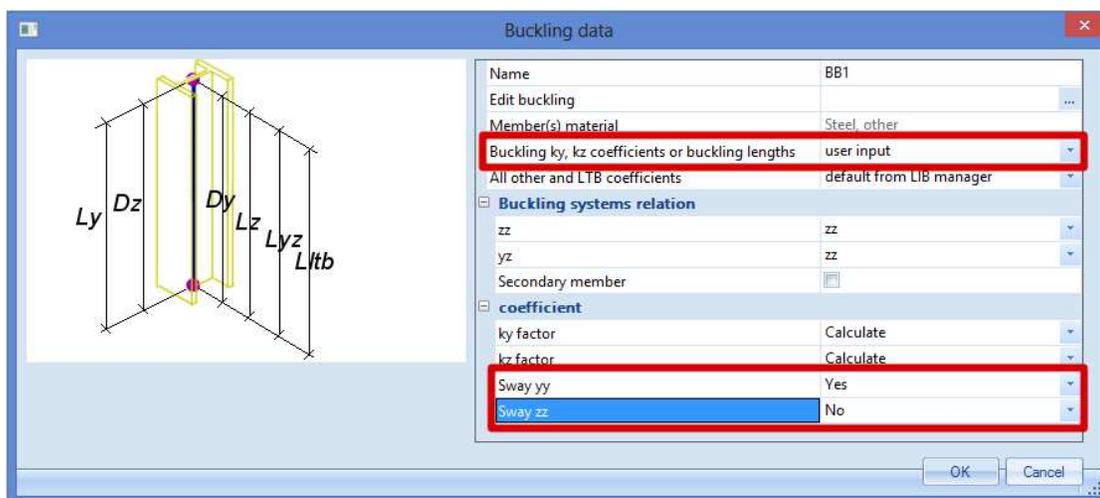
zz : flambement autour de l'axe local z (donc déformation dans la direction de l'axe local y)

L'option "contreventé" ou "non contreventé" peut être choisie dans le menu "Acier -> Barres -> Configuration Acier" pour toute la structure :



Si l'option est cochée (comme c'est le cas ici autour de l'axe y), cela veut dire que la structure n'est pas assez contreventée et peut être considérée comme à "nœuds déplaçables".

Cela peut aussi être modifié pour chaque barre séparément en utilisant les données de flambement. Vous pouvez trouver ce menu sous "Acier -> Barres -> données de contrôle -> données de flambement" :



Pour Nœuds déplaçables yy et Nœuds déplaçables zz, il y a 3 options :

- Selon Acier>Barres>Configuration : la même option sera prise comme dans la configuration acier comme montré ci-dessus.
- Oui : cette barre sera considérée comme à "nœuds déplaçables" dans cette direction.

- Non : cette barre sera considérée comme à “nœuds non déplaçables” dans cette direction.

Les formules suivantes sont utilisées pour les coefficients de flambement :

- Pour une structure à nœuds non déplaçables :

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

- Pour une structure à nœuds déplaçables :

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

avec	k	le coefficient de flambement
	L	la longueur système
	E	le module d'Young
	I	le moment d'inertie
	C_i	la rigidité au nœud i
	M_i	le moment au nœud i
	ϕ_i	la rotation au nœud i

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

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

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

Les valeurs pour M_i et ϕ_i sont déterminées approximativement par les efforts internes et les déformations calculés par des cas de charges qui génèrent des formes de déformée qui ont une affinité avec la forme de flambement. Lorsque vous exécutez un calcul linéaire, 2 cas de charges additionnels sont calculés en arrière plan seulement pour calculer les coefficients de flambement des barres.

Ce calcul est fait automatiquement lorsque vous exécutez un calcul linéaire. **Lorsqu'un calcul non linéaire est exécuté, l'utilisateur doit aussi faire un calcul linéaire sinon les coefficients de flambement ne seront pas calculés et le contrôle d'acier ne peut pas être exécuté.**

Les cas de charges suivants sont considérés dans le calcul linéaire pour le calcul des coefficients de flambement :

- Cas de charge 1:
 - o Sur les poutres, des charge linéaires locales $q_y=1$ N/m et $q_z=-100$ N/m sont utilisés
 - o Sur les poteaux, des charges linéaires globales $Q_x =10000$ N/m et $Q_y =10000$ N/m sont utilisés.
- Cas de charge 2:
 - o Sur les poutres, des charge linéaires locales $q_y=-1$ N/m et $q_z=-100$ N/m sont utilisés
 - o Sur les poteaux, des charges linéaires globales $Q_x =-10000$ N/m et $Q_y =-10000$ N/m sont utilisés.

L'approche utilisée donne de bons résultats pour les structures de type portiques avec des **barres perpendiculaires avec connexions rigides ou semi-rigides**. Pour les autres cas, l'utilisateur doit évaluer les coefficients de flambement.

Exemple : Buckling Factor.esa

Considérons le poteau B1:

- L = 4000mm
- Nœuds déplaçables
- Au nœud N1 : $M_y = 0 \text{ kNm} \Rightarrow C_2 = \rho_2 = 0.0$
- Ce nœud N1 définit ρ_2 parce que ρ_2 est toujours le plus petit des deux.
- Au nœud N2 pour le cas de charge LC1:
 - o $M_{y1} = 79833 \text{ kNm}$
 - o $\phi_1 = \text{fiy} = 1530.6 \text{ mrad}$
 - o $C_1 = M_{y1} / \phi_1 = 79833 \text{ kNm} / 1530.6 \text{ mrad} = 52.158 \text{ kNm/mrad}$
 $= 5,2158 \times 10^{10} \text{ Nmm/rad}$
 - o $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
 - o $I_y = 162700000 \text{ mm}^4$
 - o $\rho_1 = \frac{C_1 L}{EI} = \frac{5.2158 \frac{10^{10} \text{ Nmm}}{\text{rad}} \cdot 4000 \text{ mm}}{210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 162700000 \text{ mm}^4} = 6.106$
 - o $x = \frac{4\rho_1\rho_2 + \pi^2\rho_1}{\pi^2(\rho_1 + \rho_2) + 8\rho_1\rho_2} = \frac{4 \cdot 6.106 \cdot 0.0 + \pi^2 \cdot 6.106}{\pi^2(6.106 + 0.0) + 8 \cdot 6.106 \cdot 0.0} = 1.0$
 - o $k = x \sqrt{\frac{\pi^2}{\rho_1 x}} + 4 = 1.0 \sqrt{\frac{\pi^2}{6.11 \cdot 1.00}} + 4 = 2.37$
 - o $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{k^2 L^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 162700000 \text{ mm}^4}{(2.37)^2 (4000)^2} = 3752200 \text{ N} = 3752.2 \text{ kN}$

Ces valeurs peuvent aussi être lues dans SCIA Engineer:

Sous “Acier -> Barres -> Elancement acier” la longueur de flambement k_y peut être affichée :

Steel slenderness

Linear calculation

Member	CS Name	Part	Sway y	Ly [m]	ky [-]	ly [m]	Lam y [-]	lyz [m]	I LTB [m]
			Sway z	Lz [m]	kz [-]	lz [m]	Lam z [-]		
B1	CS1	1	Yes	4,000	2,37	9,466	63,28	4,000	4,000
			Yes	4,000	1,00	4,000	105,61		

Cette valeur peut aussi être lue dans le contrôle de stabilité en allant dans le menu “Acier -> Barres -> Contrôle ELU -> Contrôle” sous les paramètres de flambement. Vous pouvez aussi trouver l'effort normal critique N_{cr} :

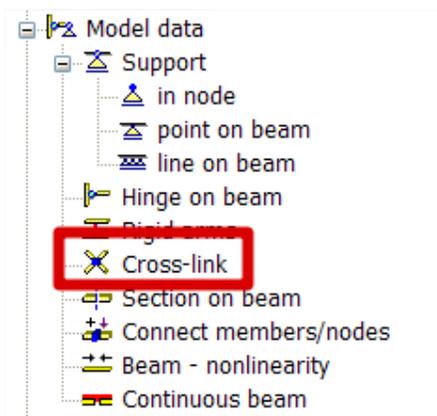
Buckling parameters	yy
Sway type	sway
System length L	4,000
Buckling factor k	2,37
Buckling length Lcr	9,466
Critical Euler load N_{cr}	3763,45
Slenderness Lambda	63,28
Relative slenderness Lambda,rel	0,67
Limit slenderness Lambda,rel,0	0,20

Calcul des coefficients de flambement pour les contreventements

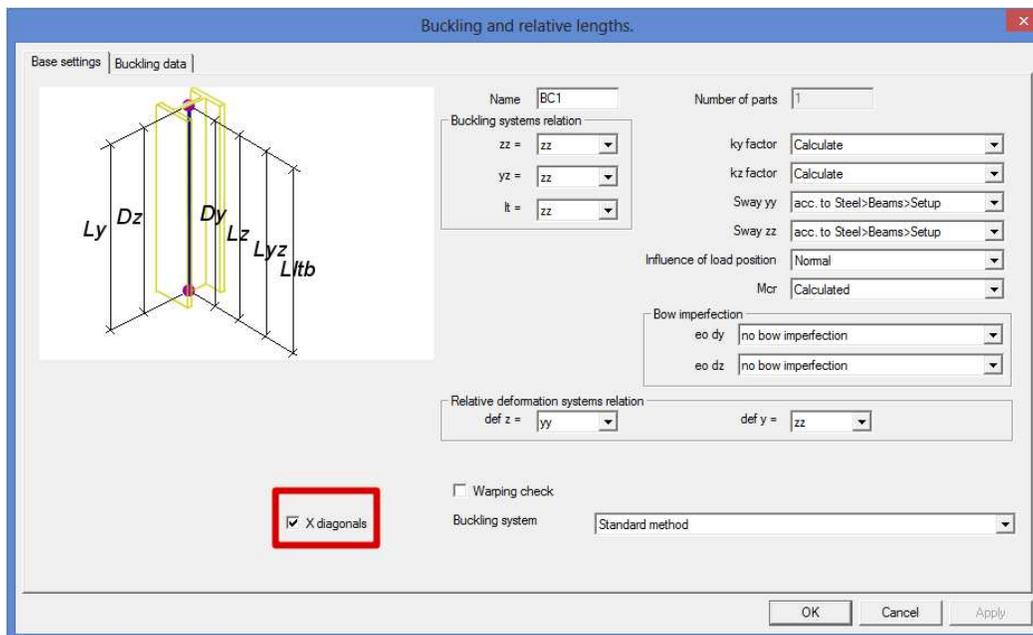
Etant donné que la méthode précédente est valable uniquement pour les connexions perpendiculaires, elle ne peut pas être utilisée pour le calcul des coefficients de flambement pour les diagonales.

Dans le DIN 1880 Teil 2, Table 15 une méthode est donnée pour le calcul du coefficient de flambement pour les diagonales. 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 sur l'élément et s_k n'est pas une donnée purement géométrique.

Cette méthode est seulement applicable pour 2 diagonales avec une connexion rigide ou articulée au milieu. Pour utiliser cette fonctionnalité dans SCIA Engineer, l'utilisateur doit connecter les deux diagonales avec l'option “Lien transversal”, qui peut être trouvé dans le menu Structure :



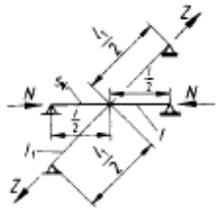
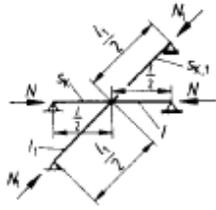
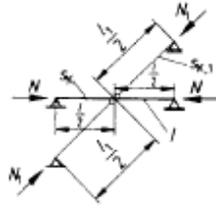
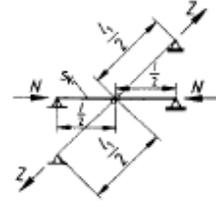
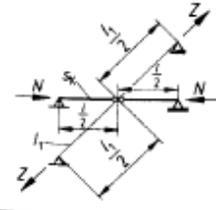
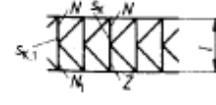
Lorsque vous connectez deux barres avec cette option, l'option **X-diagonals** sera activée automatiquement dans les propriétés de flambement et de longueurs système des deux barres :



Si cette option est activée, SCIA Engineer utilisera la méthode du DIN pour calculer les coefficients de flambement pour les diagonales.

REMARQUE

Lorsque vous utilisez les liens transversaux, cette option est automatiquement activée. L'utilisateur doit vérifier si cela est souhaité ou pas. Par exemple, en modélisant des pannes et des arbalétriers en utilisant les liens transversaux, l'option X-diagonals pourrait ne pas être activée.

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

With:

- s_K longueur de flambement
- L longueur de barre
- l_1 longueur de la diagonale d'appui
- I moment d'inertie (dans le plan de flambement) de la barre
- I_1 moment d'inertie (dans le plan de flambement) de la diagonale d'appui
- N effort de compression dans la barre
- N_1 effort dans compression dans la diagonale d'appui
- Z effort de tension dans la diagonale d'appui
- E module d'élasticité

Calcul du coefficient de flambement pour un élément à Hauteur variable

Pour un élément à hauteur variable, SCIA Engineer va utiliser un autre calcul pour la longueur de flambement.

Un élément à Hauteur variable est défini comme suit :

L'élément a les propriétés d'une section I symétrique tel que seule la hauteur est une variable linéaire le long de l'élément. La longueur système pour le flambement autour de l'axe local yy (axe fort), est égale à la longueur de l'élément.

Pour un élément à Hauteur variable, (du nœud i au nœud j), nous pouvons définir

L	longueur de la barre
I_i, I_j	moment d'inertie à l'extrémité i et j
A_i, A_j	aire de la section à l'extrémité i et j
E	module d'Young
N_{cr}	effort critique d'Euler
R_i, R_j	rigidité de la barre à l'extrémité i et j

Les rigidités R et R' sont données par :

$$R = \frac{M}{\Phi}$$

$$R_i' = R_i \frac{L}{EI_i}$$

$$R_j' = R_j \frac{L}{EI_i}$$

$$\xi = \sqrt{\frac{I_j}{I_i}}$$

L'effort critique d'Euler est donné par :

$$N_{cr} = \frac{\alpha^2 EI_i}{k^2 L^2}$$

Pour calculer α , les étapes suivantes sont :

1. Calculez L, $I_i, I_j, R_i, R_j, R_i', R_j', \xi$

2. Nous supposons que

$$\frac{\alpha}{\xi - 1} > \frac{1}{2}$$

3. Calculez a, b, c et d comme suit :

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha^2}{(\xi - 1)^2} - \frac{1}{4}}$$

$$a = \frac{1}{\alpha^2} \left[1 + (\xi - 1) \left(\frac{1}{2} - \beta \cotg(\beta \ln \xi) \right) \right]$$

$$b = c = \frac{1}{\alpha^2} \left[1 - \frac{\beta}{\sin(\beta \ln \xi)} \frac{\xi - 1}{\sqrt{\xi}} \right]$$

$$d = \frac{1}{\alpha^2} \left[1 + \frac{(\xi - 1)}{\xi} \left(\frac{1}{2} + \beta \cotg(\beta \ln \xi) \right) \right]$$

4. Pour une barre dans un système contreventé, on résout
 $1 + a R_i' + d R_j' + (ad - bc) R_i' R_j' = 0$

Pour une barre dans un système non contreventé, on résout
 $R_i'(1 - a\alpha^2) + R_j'(1 - d\alpha^2) - \alpha^2 + R_i' R_j'(a - b - c + d - \alpha^2(ad - bc)) = 0$

5. Lorsqu'une solution est obtenue, nous contrôlons si

$$\frac{\bar{\alpha}}{\xi - 1} > \frac{1}{2}$$

6. Si non, il faut alors calculer a,b,c et d comme suit :

$$a = \frac{1}{\alpha^2} \left[1 + \frac{(\xi - 1) \left(\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \xi^\beta - \left(\frac{1}{2} + \beta \right) \xi^{-\beta} \right)}{\xi^\beta - \xi^{-\beta}} \right]$$

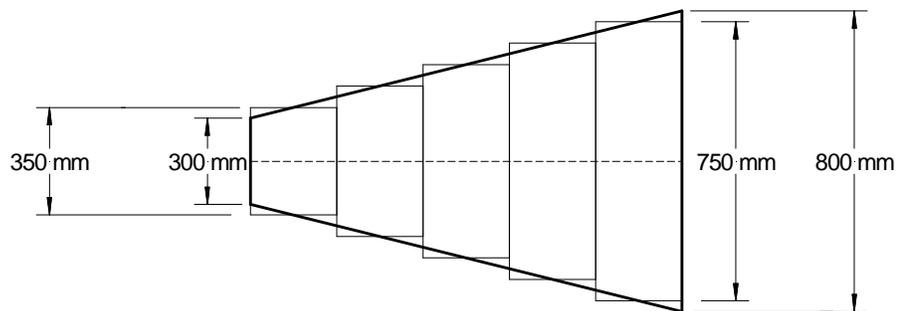
$$b = c = \frac{1}{\alpha^2} \left[1 - \frac{2\beta(\xi - 1)}{\sqrt{\xi}(\xi^\beta - \xi^{-\beta})} \right]$$

$$d = \frac{1}{\alpha^2} \left[1 + \frac{(\xi - 1) \left(\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \xi^{-\beta} - \left(\frac{1}{2} + \beta \right) \xi^\beta \right)}{\xi(\xi^\beta - \xi^{-\beta})} \right]$$

Et résoudre l'équation de 4.

Exemple:

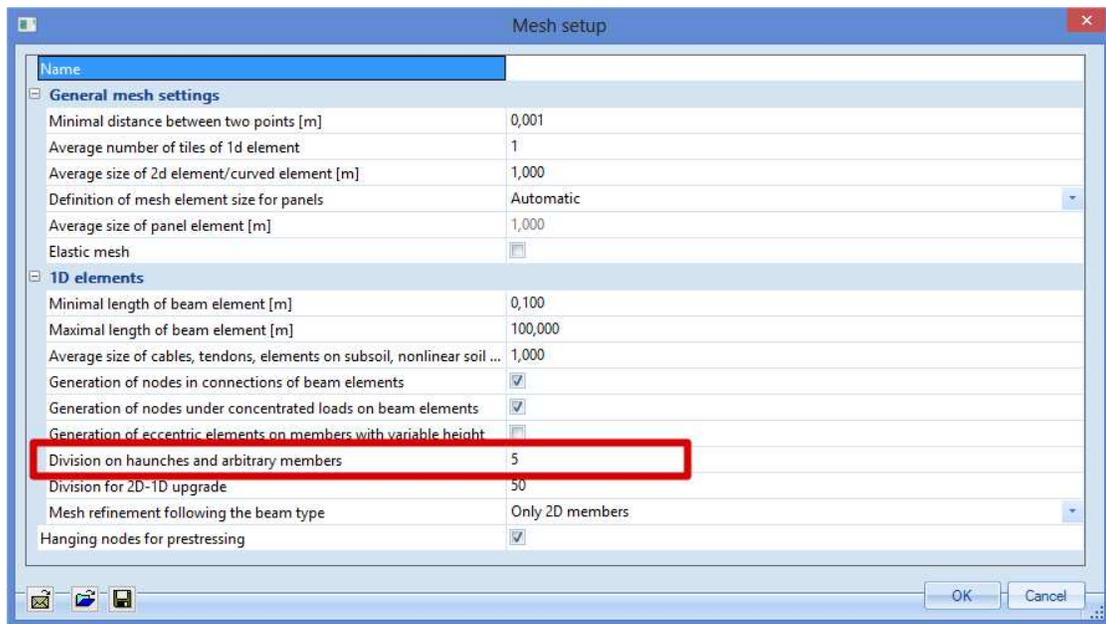
VARH.esa



Considérons le poteau B1

L'élément de Hauteur variable allant de 800mm à 300mm

L'élément variable est divisé intérieurement en un nombre d'éléments prismatiques. Dans ce cas, en 5 parties, mais cela peut être modifié dans la Configuration de Maillage :



- Au nœud N1:
 - o $h_i = 350 \text{ mm}$
 - o $l_i = 2.403 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$
 - o $M=0 \rightarrow R_i, R_i' = 0.0$

- Au nœud N1:
 - o $\varphi_y = 1512 \text{ mrad}$
 - o $M_y = 79818 \text{ kNm}$
 - o $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 - o $h_j = 750 \text{ mm}$
 - o $l_i = 1.363 \times 10^9 \text{ mm}^4$
 - o $R_j = 5.28 \times 10^{10}$
 - o $R_j' = 4.2$
 - o $\xi = 2.38$
 - o $\alpha = 1.75$

$\Rightarrow N_{cr} = 9626.16 \text{ kN}$

Buckling parameters	yy	zz	
Sway type	sway	sway	
System length L	4,000	4,000	m
Buckling factor k		1,00	
Buckling length Lcr	7,194	4,000	m
Critical Euler load Ncr	9626,42	7001,16	kN
Slenderness Lambda	48,91	57,35	
Relative slenderness Lambda,rel	0,52	0,61	
Limit slenderness Lambda,rel,0	0,20	0,20	
Buckling curve	c	c	
Imperfection Alpha	0,49	0,49	
Reduction factor Chi	0,83	0,78	
Buckling resistance Nb,Rd	2170,71	2034,24	kN

Longueur de flambement

Dans le paragraphe précédent, le calcul général des coefficients de flambement a été expliqué pour tous les types d'éléments. Avec ce coefficient de flambement, la longueur de flambement de la barre sera calculée comme suit :

$$l = k \cdot L$$

Avec :

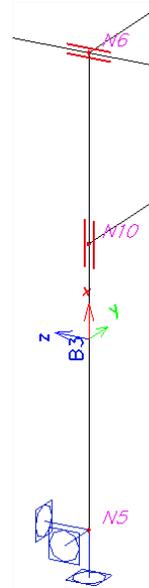
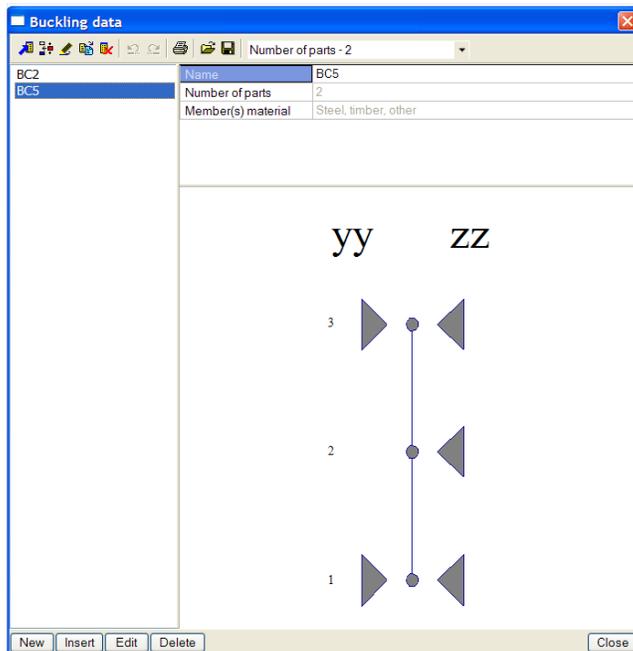
l	la longueur de flambement
k	le coefficient de flambement
L	la longueur système

La longueur système d'une barre est définie par la propriété "Longueurs de référence" de la barre.

Exemple: Buckling Length.esa

Considérons le poteau B3. Ce poteau a 3 nœuds : N5, N10 et N6. La direction de l'axe local X va du bas vers le haut du poteau, N5 est donc le premier nœud du poteau et N6 est le dernier.

Dans la fenêtre des propriétés du poteau, l'utilisateur peut choisir "Longueurs de référence". Avec cette option, la longueur système de la barre peut être définie. Par défaut, l'option ci-dessous s'affiche :



Explication des Longueurs Système :

- Le premier nœud (selon l'axe local x) est le nœud N5, le dernier est le nœud N6.
- Direction yy :
 - o Cela veut dire **autour** de l'axe local y. Le poteau va donc se déformer dans la direction z.
 - o Autour de l'axe y, le nœud N5 est sur appui. Au nœud N10, aucune barre n'a été trouvée selon la direction de l'axe local z, le poteau B3 n'est pas appuyé autour de l'axe y au nœud N10. Au nœud N6, une barre horizontale dans la direction locale z a été trouvée et le poteau sera supporté autour de l'axe local y (yy) au nœud N6. Cela est indiqué dans cette fenêtre à l'aide de triangles :
 - Appui au nœud N5
 - Pas d'appui au nœud N10
 - Appui au nœud N6

- Directions zz :
 - o Cela veut dire **autour** de l'axe local. Le poteau va donc se déformer dans la direction y.
 - o Autour de l'axe z, le nœud N5 est appuyé. Au nœud N10 une barre horizontale suivant la direction de l'axe local y est trouvée et le poteau sera appuyé autour de l'axe local z (zz) au nœud N10. Aussi au nœud N6, une barre horizontale dans la direction locale y est trouvée et le poteau sera aussi appuyé autour de l'axe local z (zz) au nœud N6. Ceci est indiqué avec des triangles dans la fenêtre :
 - Appui au nœud N5
 - Appui au nœud N10
 - Appui au nœud N6

- La longueur système sera prise en compte comme suit :
 - o Autour de l'axe y : la longueur entre le nœud N5 et N6: donc 3m
 - o Autour de l'axe z : la longueur entre le nœud N5 et N10 pour la première partie de la barre (1,8m) et la longueur entre N10 et N6 pour la seconde partie de la barre : donc 1.2m.
 - o Cela peut aussi être trouvé dans le menu "Acier -> Barres -> Elancement acier":

Steel slenderness

Linear calculation

Member	CS Name	Part	Sway y	Ly [m]	ky [-]	ly [m]	Lam y [-]	lyz [m]	I LTB [m]
			Sway z	Lz [m]	kz [-]	lz [m]	Lam z [-]		
B3	CS3	1	Yes	3,000	1,09	3,277	18,56	1,800	1,800
			No	1,800	0,51	0,919	26,79		
B3	CS3	2	Yes	3,000	1,09	3,277	18,56	1,200	1,200
			No	1,200	0,57	0,681	19,85		

- o Dans cette fenêtre, l'utilisateur peut facilement contrôler la longueur de référence (Ly et Lz), les coefficients de flambement (ky et kz) et les longueurs de flambement (ly = ky x Ly et lz = kz x Lz).
- En cliquant sur **Editer** dans la fenêtre de données de flambement, les triangles indiquant les longueurs de référence de chaque partie de la barre peuvent être modifiés dans l'onglet suivant "Données de flambement" :

Buckling and relative lengths.

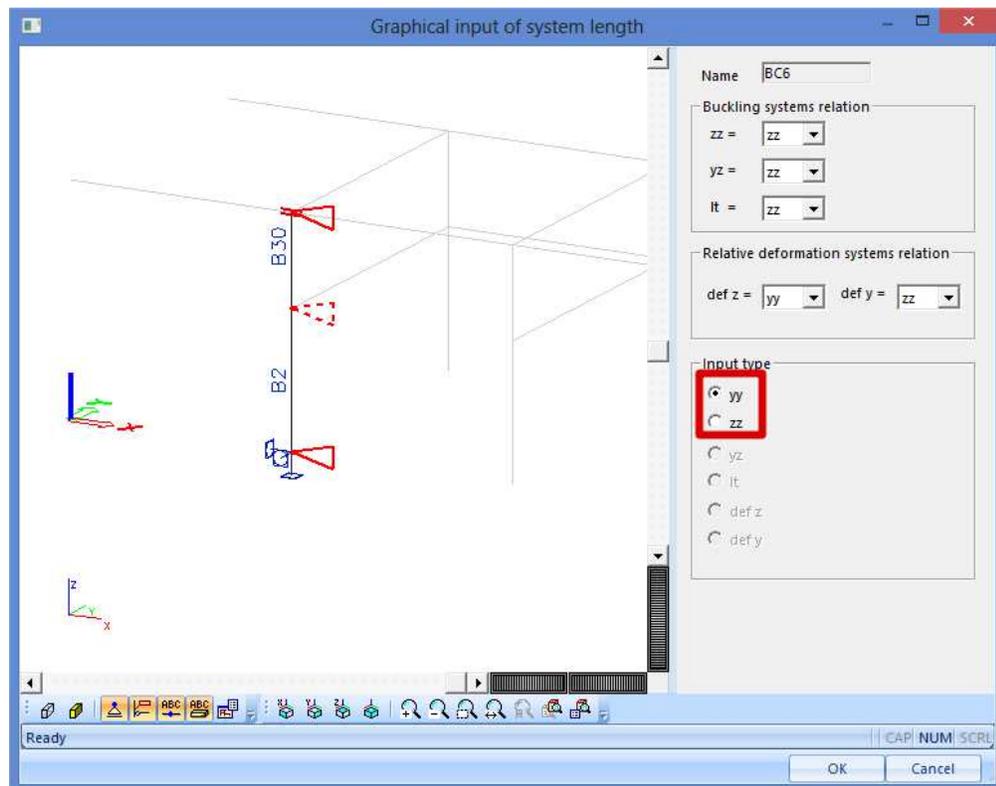
Base settings		Buckling data										
	yy	ky	Sway yy	eo dy [mm]	zz	kz	Sway zz	eo dz [mm]	kzy	klt	k	kw
1	<input checked="" type="checkbox"/> Fixed		acc. to B		<input checked="" type="checkbox"/> Fixed		acc. to B		1,00	1,00	1,00	1,00
2	<input type="checkbox"/> Free				<input checked="" type="checkbox"/> Fixed		acc. to B		1,00	1,00	1,00	1,00
3	<input checked="" type="checkbox"/> Fixed				<input checked="" type="checkbox"/> Fixed							

- Comparez les barres B3 et (B2+B30) : elles doivent avoir exactement les mêmes longueurs de référence. La seule différence entre ces poteaux est que la barre B3 a été introduite comme une barre de 3m et les deux barres (B2+B30) sont divisées en deux parties. SCIA Engineer va considérer ces deux barres aussi comme un seul système de flambement :
 - o Lorsque les axes locaux sont exactement dans la même direction (donc dans ce cas l'axe local x est dans la même direction et l'angle entre les barres est exactement 180°).
 - o Si aucune rotule n'a été introduite entre les deux barres.

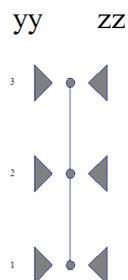
- Il y a aussi une représentation graphique des longueurs de référence :
 - o Sélectionnez la barre B2 (ou B30)
 - o Allez dans le menu des actions menu et cliquez sur **Introduction graphique de la longueur système** :



- o L'utilisateur peut maintenant choisir entre l'axe yy et zz :

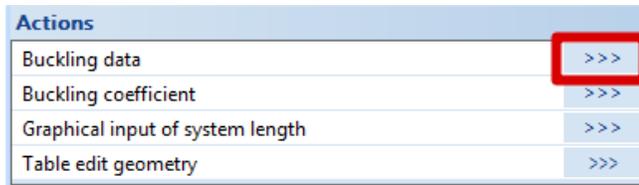


- Regardez maintenant la barre B13. Les longueurs de référence sont les suivantes (comme prévu, parce qu'il y a des barres horizontales dans les deux directions sur chaque nœud) :

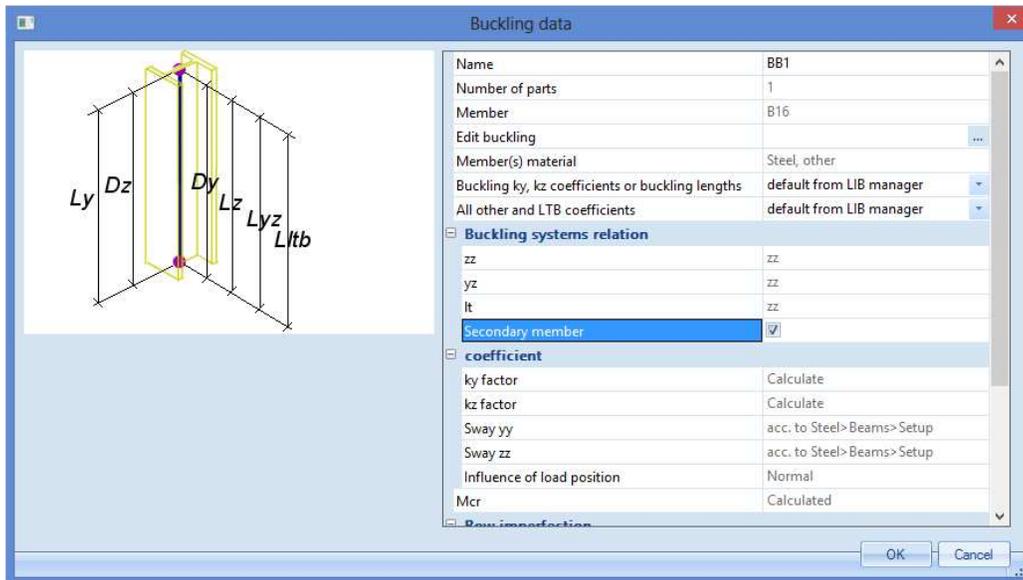


En regardant le rendu de la vue, il sera clair que la barre B16 n'est pas assez rigide pour avoir une influence sur la longueur de référence de la barre B13. Dans SCIA Engineer, il y a une possibilité d'exclure une barre du système de flambement.

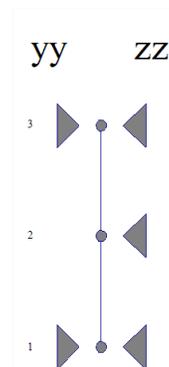
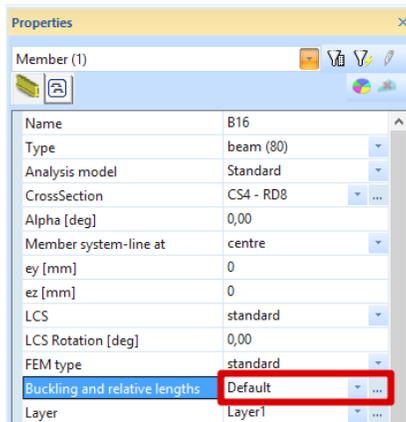
Sélectionnez donc la barre B16 et allez dans le menu Actions > **Données de flambement** :



Dans ce menu, il est possible d'indiquer que la barre B16 est une barre secondaire et ne devrait pas être prise en compte dans les longueurs de référence :



En regardant la barre B13 et en remettant les Longueurs de référence sur "défauts" la barre B16 ne sera pas prise en compte dans le système de flambement :



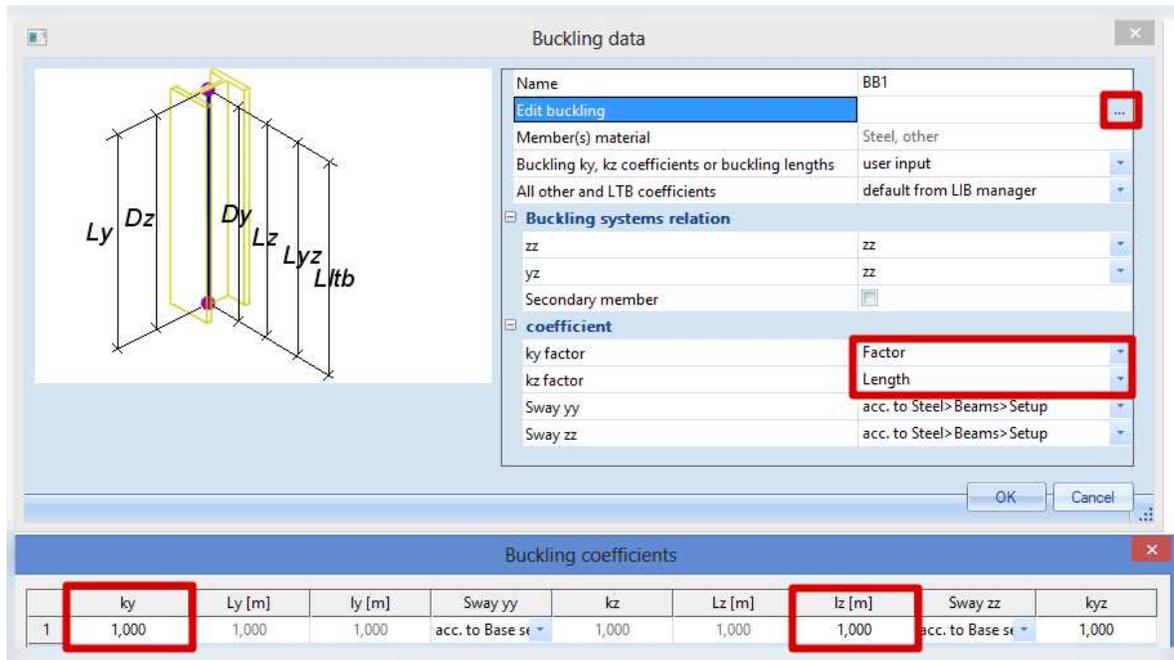
Coefficients de flambement/longueurs : introduction manuelle

Les principes du coefficient de flambement et de la longueur de flambement sont expliqués dans les paragraphes précédents. Ces configurations par défaut peuvent être modifiées dans le menu "Longueurs de référence" ou dans le menu acier avec les "données de flambement de la barre". Ce dernier a une plus grande priorité, SCIA Engineer va donc d'abord regarder s'il y a des "données de flambement de barre" sur un élément. Si oui, le programme va prendre en compte ces propriétés, si

non, le programme va regarder dans les propriétés dans "longueurs de référence" de la fenêtre des propriétés de la barre.

Dans le menu "Acier -> Barres -> Données de contrôle d'élément -> Données de flambement" l'utilisateur peut mettre les "Coefficients de flambement ky, kz ou longueurs de flambement" sur "saisie utilisateur".

L'utilisateur peut maintenant choisir pour ky et kz si ces coefficients sont calculés (par défaut dans SCIA Engineer) ou introduire le coefficient de flambement ou même directement la longueur de flambement :



Ces propriétés peuvent être affectées à un ou plusieurs éléments.

Contrôle de flambement flexionnel dans SCIA Engineer

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

Exemple : Industrial hall.esa

Considérons le poteau B28:

La classification de la barre B28 donne 4, une section droite efficace a donc été calculée :

Calculation effective area properties with direct method.

Properties					
sectional area A eff	1.5269e+04	mm ²			
Shear area Vy eff	8.9420e+03	mm ²	Vz eff	6.3269e+03	mm ²
radius of gyration iy eff	320.39	mm	iz eff	58.15	mm
moment of inertia ly eff	1.5674e+09	mm ⁴	lz eff	5.1634e+07	mm ⁴
elastic section modulus Wy eff	4.1630e+06	mm ³	Wz eff	3.9265e+05	mm ³
Eccentricity ey	0.00	mm	enz	0.00	mm

SCIA Engineer va d'abord afficher les paramètres de Flambement de cette barre :

Flexural Buckling Check

According to EN 1993-1-1 article 6.3.1.1 and formula (6.46)

Buckling parameters	yy	zz	
Sway type	sway	non-sway	
System length L	6,900	6,900	m
Buckling factor k	3,25	0,99	
Buckling length Lcr	22,415	6,832	m
Critical Euler load Ncr	6596,08	2293,84	kN
Slenderness Lambda	74,15	125,75	
Relative slenderness Lambda,rel	0,74	1,25	
Limit slenderness Lambda,rel,0	0,20	0,20	
Buckling curve	a	b	
Imperfection Alpha	0,21	0,34	
Reduction factor Chi	0,83	0,45	
Buckling resistance Nb,Rd	2976,05	1619,63	kN

Ci-dessous, les résultats pour la direction yy sont expliqués.

Cette direction a été mise sur "**contreventé**" dans la Configuration acier et avec cette option le **coefficient de flambement k** est calculé.

La longueur du poteau est 6.900m. La longueur de flambement est donc = 3.25 x 6.900 m = 22.4 m

Avec cette longueur de flambement, la charge critique d'Euler Ncr peut être calculée. Ensuite, l'élanement et l'élanement relatif Lambda peuvent être calculés avec la charge critique d'Euler.

Un profilé IPE750 a une courbe de flambement a, ce qui donne un coefficient d'imperfection alpha = 0.21.

Avec ces propriétés, le coefficient de réduction χ sera calculé et sera utilisé dans la formule suivante :

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

Cela donne une résistance au flambement Nb,Rd = 2976.05 kN pour le flambement flexionnel autour de l'axe local y.

Le même principe peut être exactement répété pour le flambement flexionnel autour de l'axe local z. Cela va donner une résistance plus faible au flambement : Nb,Rd = 1619.63 kN.

La résistance la plus faible sera utilisée dans le contrôle de flambement flexionnel :

Flexural Buckling verification		
Cross-section effective area Aeff	1,5269e+04	mm ²
Buckling resistance Nb,Rd	1619,63	kN
Unity check	0,10	-

Flambement torsionnel

Le contrôle du flambement torsionnel peut être important pour les sections dans lesquelles la position du centre de cisaillement n'est pas la même que le centre de gravité.

La résistance de flambement $N_{b,Rd}$ pour le flambement torsionnel ou torsionnel-flexionnel (suivant l'EN 1993-1-1) peut être obtenu en utilisant la courbe de flambement b et avec un élancement relatif donné par :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr}}} \beta_A$$

$$\sigma_{cr} = \min(\sigma_{cr,T}, \sigma_{cr,TF})$$

$$\sigma_{cr,T} = \frac{1}{A_g i_0^2} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E C_M}{l_T^2} \right)$$

$$\sigma_{cr,TF} = \frac{1}{A_g i_0^2} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E C_M}{l_T^2} \right)$$

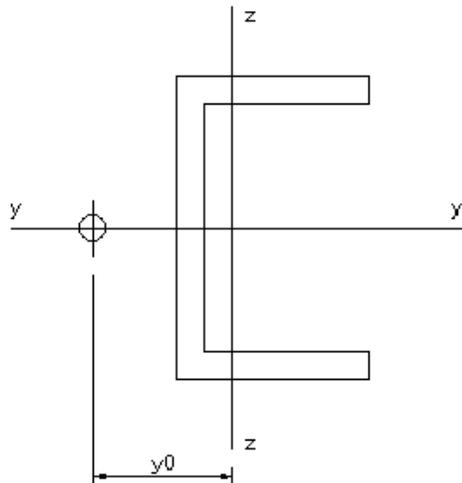
$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2$$

$$\sigma_{cr,TF} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{cr,y} + \sigma_{cr,T}) - \sqrt{(\sigma_{cr,y} + \sigma_{cr,T})^2 - 4\beta \sigma_{cr,y} \sigma_{cr,T}} \right]$$

$$\sigma_{cr,y} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{l_y}{i_y}\right)^2}$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2$$

avec	β_A	le rapport A_{eff}/A
	f_{yb}	la limite d'élasticité de base
	σ_{cr}	la contrainte critique
	$\sigma_{cr,T}$	la contrainte élastique critique pour le flambement par torsion
	$\sigma_{cr,TF}$	la contrainte élastique critique pour le flambement torsionnel-flexionnel
	G	le module de cisaillement
	E	le module d'élasticité
	I_T	la constante de torsion de la section brute
	C_M	la constante de gauchissement
	i_y	le rayon de giration autour de l'axe yy
	i_z	le rayon de giration autour de l'axe zz
	l_T	la longueur de flambement de l'élément pour le flambement torsionnel (= L_{yz})
	y_0	la position du centre de cisaillement
	l_y	la longueur de flambement pour le flambement flexionnel autour de l'axe yy



Exemple: Flexural Torsional buckling.esa

Regardez le contrôle Acier pour l'élément B1 :

Torsional (-Flexural) Buckling check

According to article EN 1993-1-1 : 6.3.1.1. and formula (6.46)

Table of values		
Torsional Buckling length	3.600	m
Ncr,T	2084.34	kN
Ncr,TF	1560.02	kN
Relative slenderness Lambda,T	0.90	
Limit slenderness Lambda,0	0.20	
Buckling curve	c	
Imperfection Alpha	0.49	
A	5.3300e+03	mm ²
Reduction factor Chi	0.60	
Buckling resistance Nb,Rd	754.36	kN
Unity check	0.13	-

Déversement

Général

Cas général

Le contrôle de déversement sera exécuté selon l'EN 1993-1-1 **art. 6.3.2.**

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

Où

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

$W_y = W_{pl,y}$ pour les sections de classe 1 ou 2

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

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

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

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{mais } \chi \leq 1,0$$

avec

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

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

M_{cr} Moment critique de flexion (voir le chapitre suivant pour ce calcul)

α Imperfection qui dépend de la courbe de flambement :

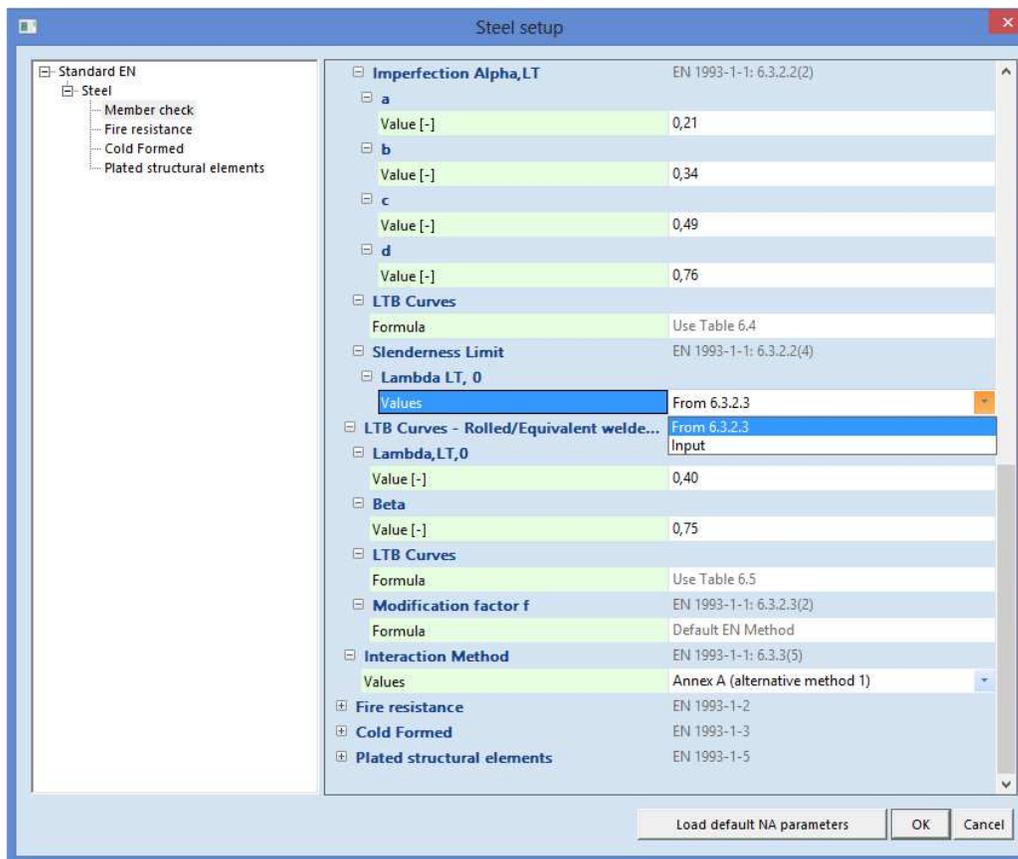
Buckling curve	a	b	c	d
Imperfection factor α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Avec les courbes de flambement suivantes recommandées pour le déversement :

Cross-section	Limits	Buckling curve
Rolled I-sections	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Welded I-sections	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Other cross-sections	-	d

Pour l'élanement $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ ou pour $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$ les effets de déversement peuvent être ignorés.

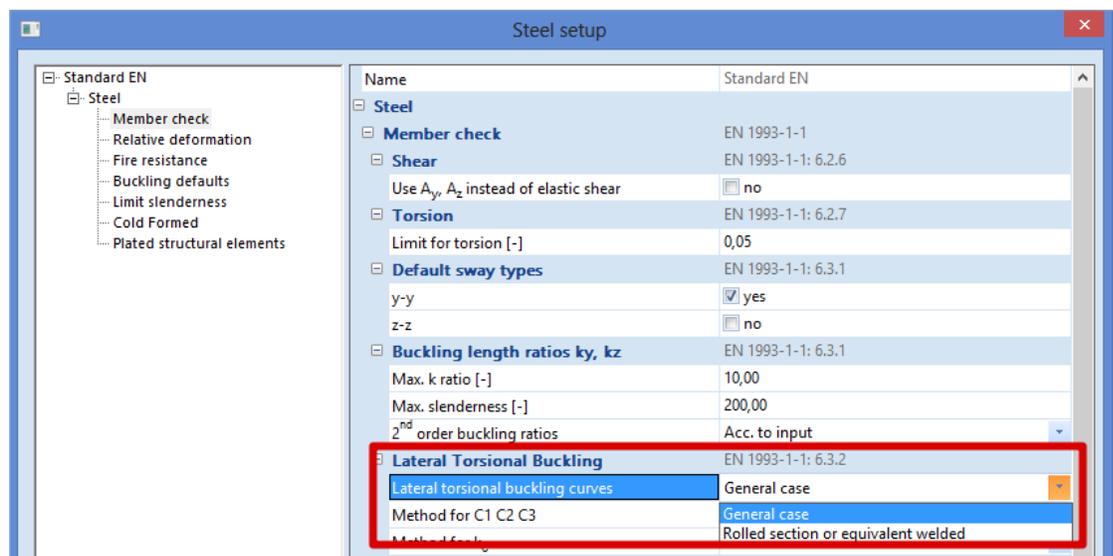
En suivant l'EN 1993-1-1 article 6.3.2.3: $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4$ mais cela peut être adapté dans l'annexe nationale d'un pays et dans SCIA Engineer aussi :



Le déversement pour les sections laminées ou soudées équivalentes

Dans l'EN 1993-1-1, une distinction est faite entre le déversement pour les cas généraux et pour les sections laminées ou soudées équivalentes.

La distinction peut aussi être choisie dans SCIA Engineer à travers "Acier -> Barres -> Configuration acier" et cela est valable pour toutes les barres :



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

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

Mais : $\chi_{LT} \leq 1,0$
 $\chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}$

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

Et

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

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

Cross-section	Limits	Buckling curve
Rolled I-sections	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
Welded I-sections	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

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

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

f peut être défini dans l'Annexe Nationale.

Les valeurs minimum suivantes sont recommandées :

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

Mais $f \leq 1,0$

Avec k_c pris par défaut du tableau suivant :

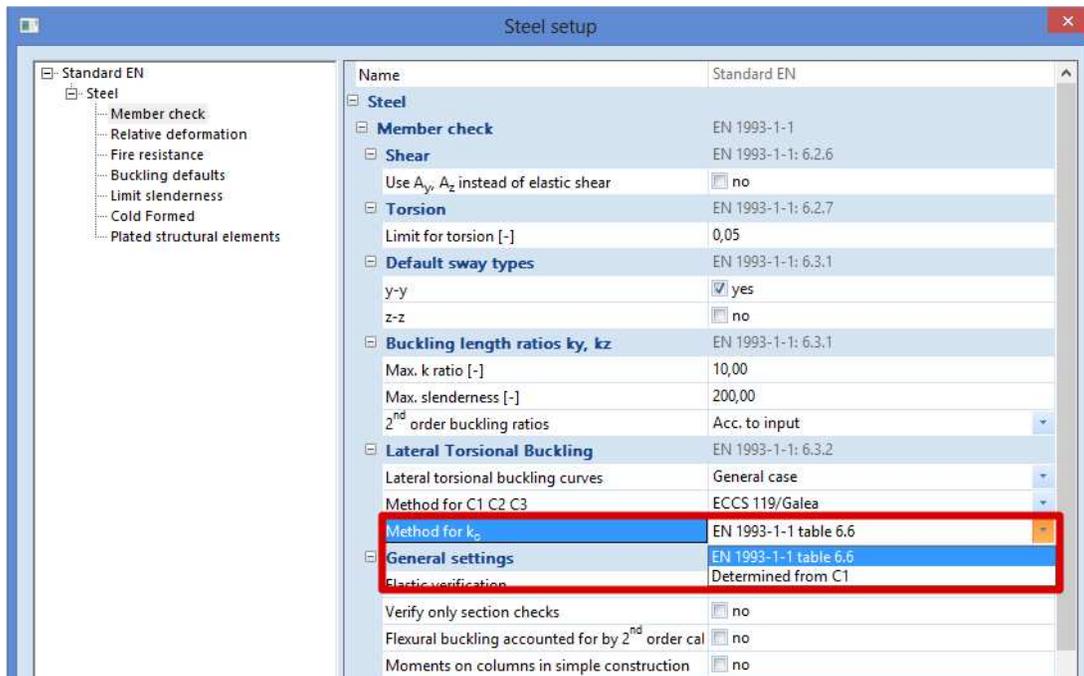
Table 6.6: Correction factors k_c

Moment distribution	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 alternativement k_c peut aussi être calculé à partir du coefficient C_1 :

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

Dans SCIA Engineer, l'utilisateur peut 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 "Acier -> Barres -> Configuration acier" :



Les valeurs aussi pour beta et $\Lambda_{LT,0}$ peuvent être adaptées dans SCIA Engineer :



Contrôle de déversement dans SCIA Engineer

Ce contrôle de déversement sera aussi exécuté dans SCIA Engineer.

Exemple: Industrial hall.esa

Considérons le poteau B114 :

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

Le contrôle de Déversement sera d'abord affiché :

Lateral Torsional Buckling Check
According to article EN 1993-1-1 : 6.3.2.1. and formula (6.54)

LTB Parameters		
Method for LTB curve	Art. 6.3.2.2.	
Wy	3.0000e+05	mm ³
Elastic critical moment Mcr	55.82	kNm
Relative slenderness Lambda,LT	1.12	
Relative slenderness Lambda,T	0.10	
Relative slenderness Lambda,EXTRA	1.23	
Limit slenderness Lambda,LT,0	0.40	
LTB curve	a	
Imperfection Alpha,LT	0.21	
Reduction factor Chi,LT	0.51	
Buckling resistance Mb.Rd	36.14	kNm
Unity check	0.50	-

Ensuite, les paramètres pour le calcul de M_{cr} seront affichés.

Mcr Parameters		
LTB length	6.000	m
k	1.00	
kw	1.00	
C1	1.13	
C2	0.45	
C3	0.53	

Note: C Parameters according to ECCS 119 2006 / Galea 2002 load in center of gravity

En dessous de cette fenêtre pour les "Paramètres de M_{cr}"- la méthode de calcul pour les paramètres C sera indiquée.

Calcul de M_{cr}

Formule générale pour les sections I

Pour les **sections I (symétrique et asymétrique)**, et les **sections Rectangulaires Creuses (RHS)**, le moment critique élastique pour le déversement M_{cr} est calculé en utilisant la formule suivante:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k \cdot L)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - [C_2 z_g - C_3 z_j] \right\}$$

Où

E	le module d'Young d'élasticité (E = 210000 N/mm ² pour l'acier)
G	le module de cisaillement (G = 80770 N/mm ² pour l'acier)
k · L	la longueur de déversement de la barre entre les points qui ont des appuis anti déversement (= l _{LTB}).
I _w	la constante de gauchissement
I _t	la constante de torsion
I _z	le moment d'inertie autour de l'axe faible
z _g	la distance entre le point d'application de la charge et le centre de cisaillement
k _w	Un coefficient qui réfère au gauchissement à l'extrémité. k _w doit être pris égal à 1,0 sauf si quelques dispositions particulières pour fixer le gauchissement ont été prises.
z _j	$z_j = z_s - 0,5 \int_A (y^2 + z^2) \frac{z}{I_y} dA$ Pour les sections doublement symétriques z _j = 0
z _s	la coordonnée du centre de cisaillement

C₁, C₂ et C₃ sont des coefficients qui dépendent du chargement et des conditions aux limites.

Dans SCIA Engineer, différentes méthodes sont implémentée pour le calcul de ces coefficients C₁ et C₂. Ces méthodes sont expliquées plus loin dans ce chapitre.

Les sections avec jarret (I+lvar, Iw+Plvar, Iw+Iwvar, Iw+lvar, I+lvar) et les sections composées rail (Iw+rail, Iwn+rail, I+rail, I+2PL+rail, I+PL+rail, I+2L+rail, I+Ud+rail) sont considérées comme des sections I équivalentes asymétriques.

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

- **C₁, C₂, C₃ : calculés selon l'ENV, ECCS ou Lopez**
- **Longueur de déversement : klt*L**
- **k et kw : coefficients liés aux conditions limites**
- **zg : position de la charge**

- **zj : assymétrie de la section**

Plus de détails à propos de chaque paramètre sont donnés dans des chapitres séparés

LTBII

Il est aussi possible de calculer M_{cr} avec un calcul plus précis, un calcul de déversement au second ordre. Cela va être expliqué plus en détail dans ce chapitre.

Général – calcul des coefficients C_1 , C_2 et C_3

C_1 : prend en compte la forme du diagramme de moment

C_2 : prend en compte la position du chargement

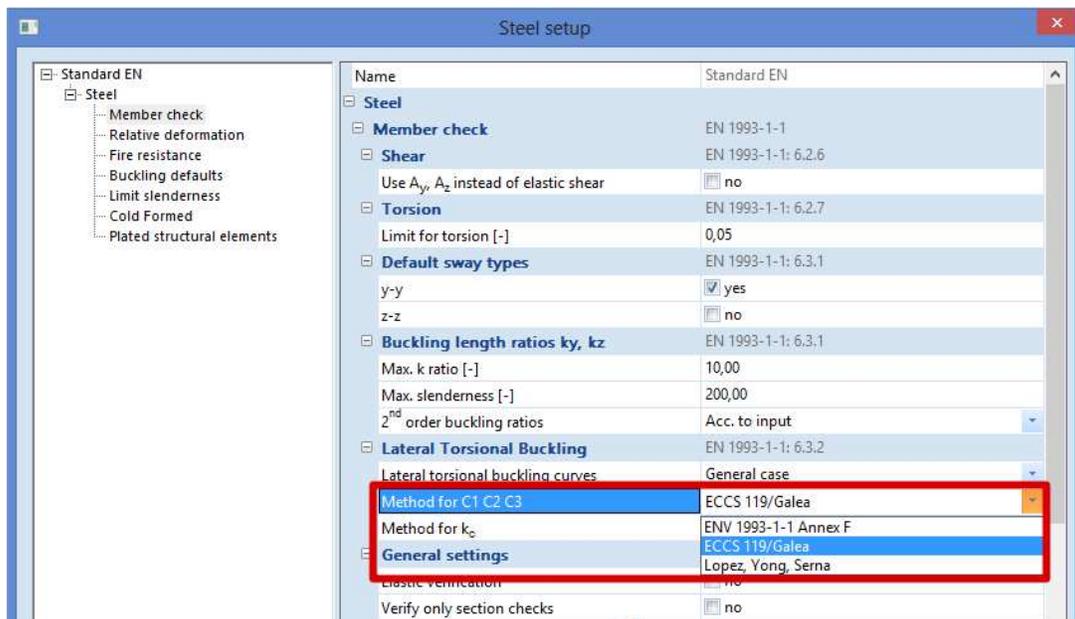
C_3 : prend en compte l'asymétrie de la section droite

Les coefficients **C_1** , **C_2** et **C_3** peuvent être calculés dans SCIA Engineer selon les trois méthodes suivantes :

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

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

L'utilisateur peut choisir entre ces 3 méthodes dans "Acier -> Barres -> Configuration acier" :



ENV 1993-1-1 Annexe F

Lorsque cette option est choisie, les coefficients de moment sont déterminés selon l'ENV 1993-1-1 Annexe F Ref.[5].

Pour déterminer les coefficients de moment (EN 1993-1-1: C_1 , C_2 et C_3) pour le déversement, des tableaux standards sont utilisés.

La distribution réelle de moment est comparée avec quelques distributions de moment standards. Ces distributions standards sont des lignes de moment générés par une charge distribuée q , une charge nodale F , ou là où la ligne de moment atteint un maximum au début ou à la fin de la barre.

Les distributions standards de moment qui sont les plus proches de la distribution actuelle de moment, est prise en compte pour le calcul des coefficients C_1 , C_2 et C_3 .

ECCS 119/Galea

Lorsque cette option est choisie, les coefficients de moment sont déterminés selon l'ECCS 119 Annexe B Ref.[34].

Les figures données dans cette référence pour C_1 et C_2 dans le cas de charge combinée proviennent de Ref.[28] ce qui en fait donne aussi les valeurs tabulées des ces figures aussi bien qu'une gamme étendue.

La distribution réelle de moment est comparée avec différentes distributions de moment. Ces distributions de moment standards sont des lignes de moment générés par une charge répartie q , une charge nodale F , où la ligne de moment est maximum au début et à la fin de la barre.

La distribution standard de moment qui est la plus proche de la distribution réelle de moment est prise en compte pour le calcul des coefficients C_1 et C_2 .

Galea donne des résultats seulement pour les coefficients C_1 et C_2 .

C_3 est pris à partir de l'ECCS 119 Annexe B tableaux 63 et 64. Le C_3 est déterminé en se basant sur le cas pour lequel la valeur de C_1 correspond le mieux à la valeur du tableau.

Lopez, Yong, Serna

Lorsque cette méthode est choisie, les coefficients de moment sont déterminés selon Lopez, Yong, Serna Ref[35].

En utilisant cette méthode, les coefficients C_2 et C_3 sont pris comme **zéro**.

Le coefficient C_1 est calculé comme suit :

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

Où :

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

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

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

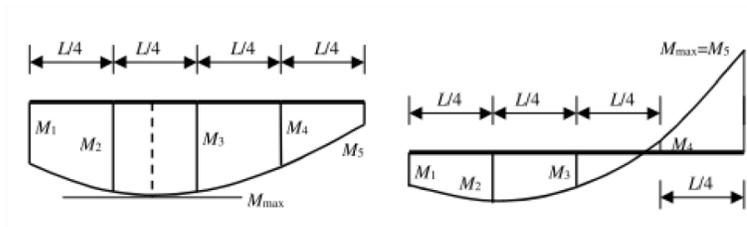
$$\alpha_1 = 1 - k_2$$

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

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

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

$$\alpha_5 = 1 - k_1$$



Avec :

- k_1 Pris égal à k_w
- k_2 Pris égal à k_w
- M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 Les moments M_y sont déterminés selon le système de flambement dans les sections considérées comme montré dans la figure ci-dessus. Ces moments sont déterminés en divisant la barre en 10 parties (11 sections) et en interpolant entre ces sections.
- M_{max} Le moment maximal M_y suivant le système de déversement.

Cette méthode est seulement supportée dans le cas où k et k_w sont tous les deux égaux à 0.50 ou 1.00.

Comparaison entre les 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 choisie pour les coefficients C a été modifiée. Ci-dessous, un aperçu des résultats pour ces coefficients pour les trois méthodes :

ENV 1993-1-1 Annexe F			ECCS 119/Galea			Lopez, Yong, Serna		
Mcr Parameters			Mcr Parameters			Mcr Parameters		
LTB length	12.000	m	LTB length	12.000	m	LTB length	12.000	m
k	1.00		k	1.00		k	1.00	
k_w	1.00		k_w	1.00		k_w	1.00	
C1	1.89		C1	1.26		C1	1.20	
C2	0.33		C2	0.45		C2	0.00	
C3	2.64		C3	0.41		C3	0.00	
Mcr = 1576.03 kNm			Mcr = 1118.50 kNm			Mcr = 842.64 kNm		

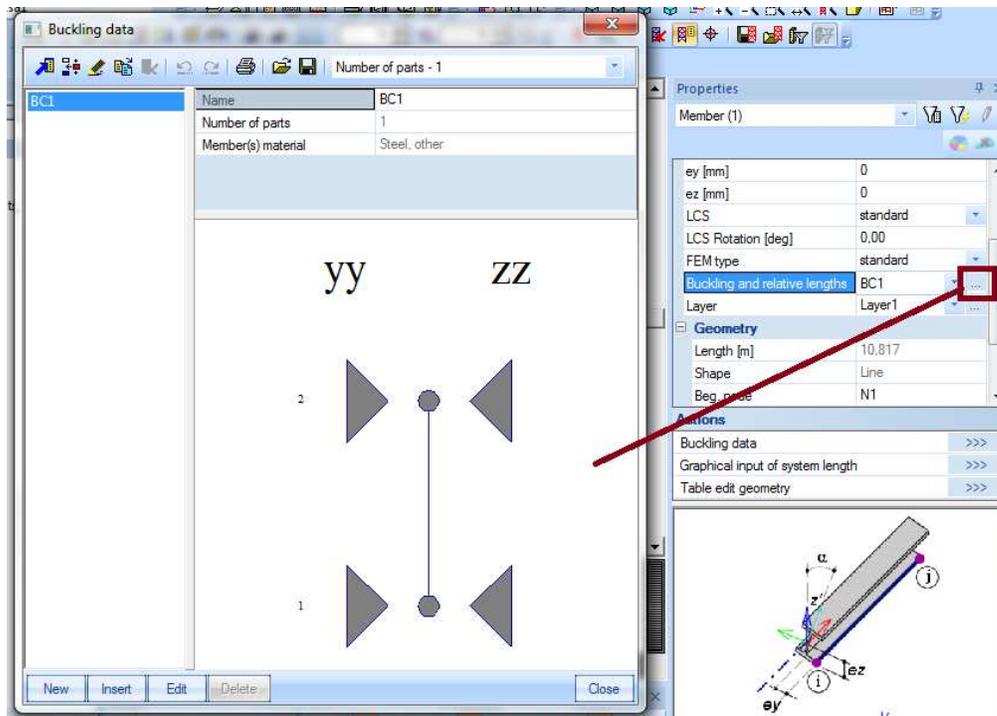
Il peut y avoir une grande différence entre les trois modèles de calcul.

Dans la méthode selon "Lopez, Yong, Serna" les valeurs pour C2 et C3 sont toujours pris égal à zéro. En comparant les coefficients C1, les méthodes selon l'"ECCS 119/Galea" et "Lopez, Yong, Serna" donnent approximativement la même chose (1.26 et 1.20 respectivement), mais le coefficient C1 selon l'"ENV 1993-1-1 Annexe F" donne une valeur complètement différente : 1.89.

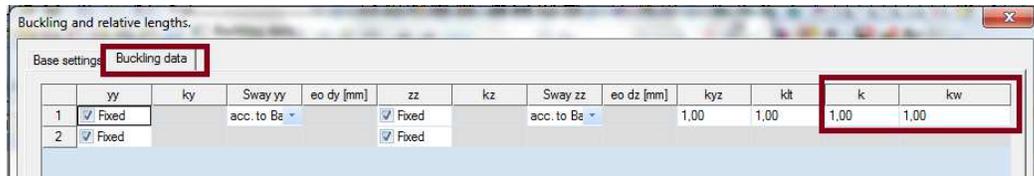
Coefficients k et k_w

Il est généralement supposé que $k = k_w = 1$, ce qui veut dire que les extrémités sont libres. Si les extrémités sont fixes, des valeurs plus petites que 1 peuvent être utilisées et cela donnerait des valeurs de Mcr qui sont plus élevées. Vous pouvez adapter les valeurs de k et k_w à partir des données de flambement de l'élément.

Sélectionnez l'élément puis ouvrez le menu 'Longueurs de référence' à partir de la fenêtre des propriétés :



Cliquez sur le bouton Editer puis allez dans l'onglet 'données', vous pouvez modifier ici les valeurs de k et k_w :

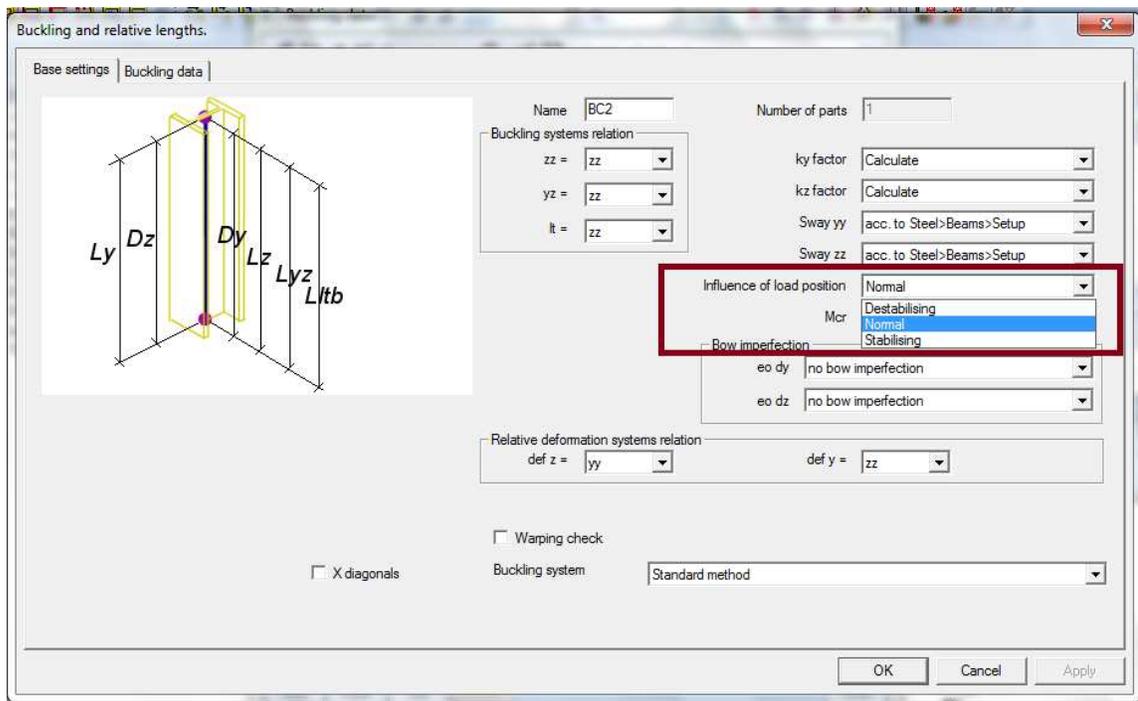


Position de la charge

La position de la charge a une influence sur le M_{cr} calculé à travers la valeur de z_g . L'utilisateur peut choisir parmi trois positions.

Si vous ouvrez le menu 'Longueurs de référence', vous pouvez voir une option nommée 'Infl. Pos. Des charges'. Les trois possibilités sont :

- Déstabilisant : la charge est appliquée sur la semelle supérieure
- Normal : la charge est appliquée à l'axe neutre
- Stabilisant : la charge est appliquée sur la semelle inférieure

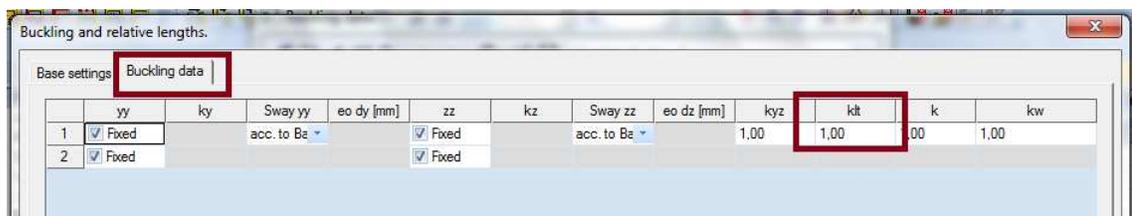


Cette valeur est par défaut mise sur 'Normal' et peut être adaptée pour influencer la valeur de M_{cr} .

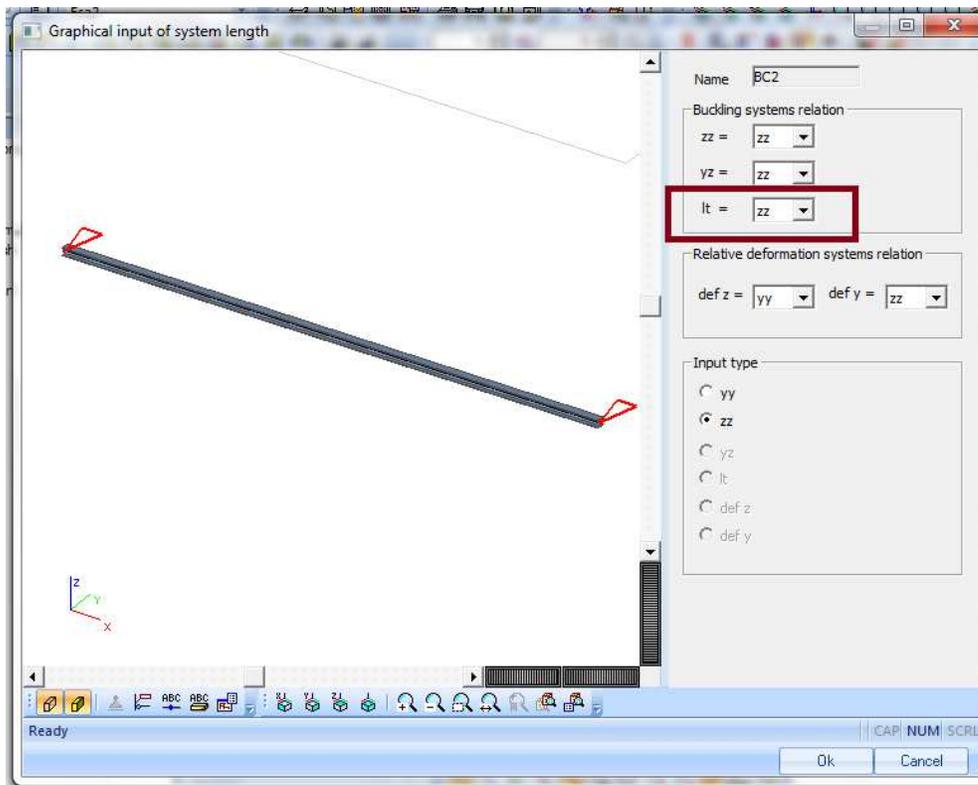
Longueur de déversement

La longueur de déversement est calculée comme $L_{it} = k_{it} * l_{ref}$

k_{it} est par défaut prise égale à 1. Une valeur plus petite peut être utilisée pour réduire la longueur de déversement. Vous pouvez adapter k_{it} à partir des données de flambement de l'élément :

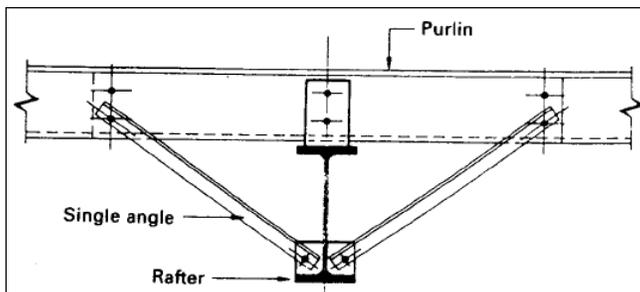


l_{ref} est la longueur de référence. Il est par défaut égal à la longueur de référence autour de l'axe faible (lz) pour la semelle supérieure et inférieure :



La longueur de référence peut être remplacée par une autre valeur en utilisant les appuis de déversement. Ces appuis permettent de définir des conditions séparées pour la semelle supérieure et inférieure.

Appuis de déversement



Dans SCIA Engineer, les appuis de déversement peuvent être introduits. Ces appuis vont modifier la longueur de déversement, utilisée pour le calcul de M_{cr} :

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k \cdot L)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - [C_2 z_g - C_3 z_j] \right\}$$

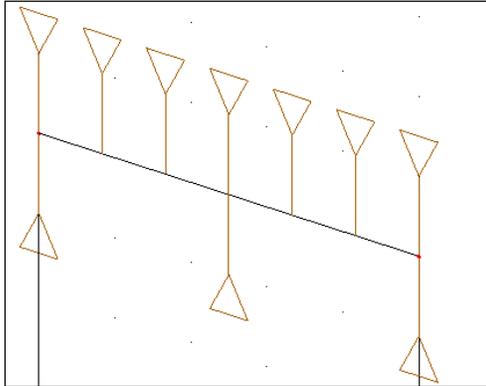
Où

$k \cdot L$ la longueur de déversement de la barre entre les points qui ont des appuis de déversement ($= l_{LTB}$).

Cette longueur sera prise comme la distance entre deux appuis de déversement.

Des appuis de déversement fixes sont définis sur la semelle supérieure ou inférieure. Les longueurs de déversement pour la semelle comprimée sont prises comme la distance entre ces appuis. Les coefficients de moment de déversement sont calculés entre ces appuis.

Les appuis peuvent être introduits via "Acier -> Barres -> données de contrôle d'élément -> Appuis de déversement".

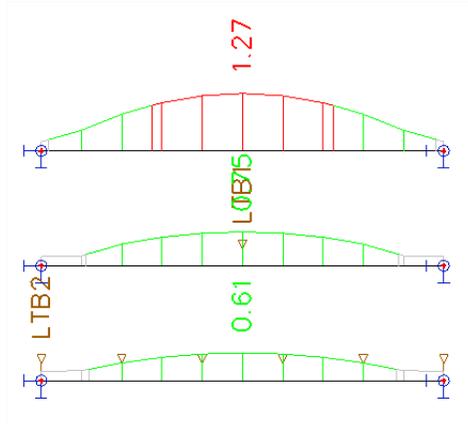


Seuls les appuis du côté comprimé sont pris en compte.

Exemple: LTB_Constraints.esa

Dans cet exemple, la même barre est modélisée trois fois :

Ci-dessous les résultats pour le cas de charge LC1 :



B1			B2		
Lateral Torsional Buckling Check According to article EN 1993-1-1 : 6.3.2.1. and formula (6.54)			Lateral Torsional Buckling Check According to article EN 1993-1-1 : 6.3.2.1. and formula (6.54)		
LTB Parameters			LTB Parameters		
Method for LTB curve	Art. 6.3.2.2.		Method for LTB curve	Art. 6.3.2.2.	
Wy	1.7020e-03	m³	Wy	1.7020e-03	m³
Elastic critical moment Mcr	281.38	kNm	Elastic critical moment Mcr	977.38	kNm
Relative slenderness Lambda,LT	1.19		Relative slenderness Lambda,LT	0.64	
Limit slenderness Lambda,LT,0	0.40		Limit slenderness Lambda,LT,0	0.40	
LTB curve	b		LTB curve	b	
Imperfection Alpha,LT	0.34		Imperfection Alpha,LT	0.34	
Reduction factor Chi,LT	0.48		Reduction factor Chi,LT	0.82	
Buckling resistance Mb,Rd	192.93	kNm	Buckling resistance Mb,Rd	326.63	kNm
Unity check	1.27	-	Unity check	0.75	-
Mcr Parameters			Mcr Parameters		
LTB length	7.000	m	LTB length	3.500	m
k	1.00		k	1.00	
kw	1.00		kw	1.00	
C1	1.13		C1	1.33	
C2	0.45		C2	0.12	
C3	0.53		C3	1.00	

Pour la barre, 6 appuis sont introduits et donc le calcul de déversement ne sera pas exécuté :

Si $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ ou pour $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$ les effets de déversement peuvent être ignorés. Avec : $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$

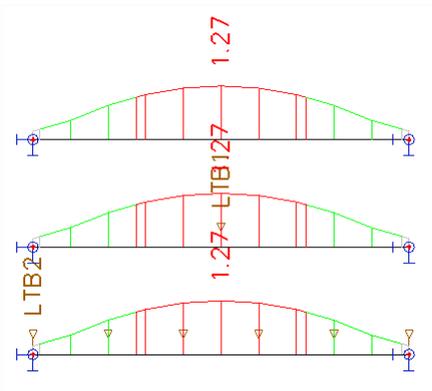
Pour la barre B3, le contrôle de déversement suivant sera affiché :

Lateral Torsional Buckling Check
According to article EN 1993-1-1 : 6.3.2.1. and formula (6.54)

LTB Parameters		
Method for LTB curve	Art. 6.3.2.2.	
Wy	1.7020e-03	m³
Elastic critical moment Mcr	4043.43	kNm
Relative slenderness Lambda,LT	0.31	
Limit slenderness Lambda,LT,0	0.40	

The slenderness or bending moment is such that Lateral Torsional Buckling effects may be ignored according to EN 1993-1-1 article 6.3.2.2(4)
Element satisfies the stability check !

Lorsqu'on regarde le cas de charge LC2, la semelle supérieure de la barre sera en tension, SCIA Engineer ne prendra donc pas en compte les effets des appuis de déversement :



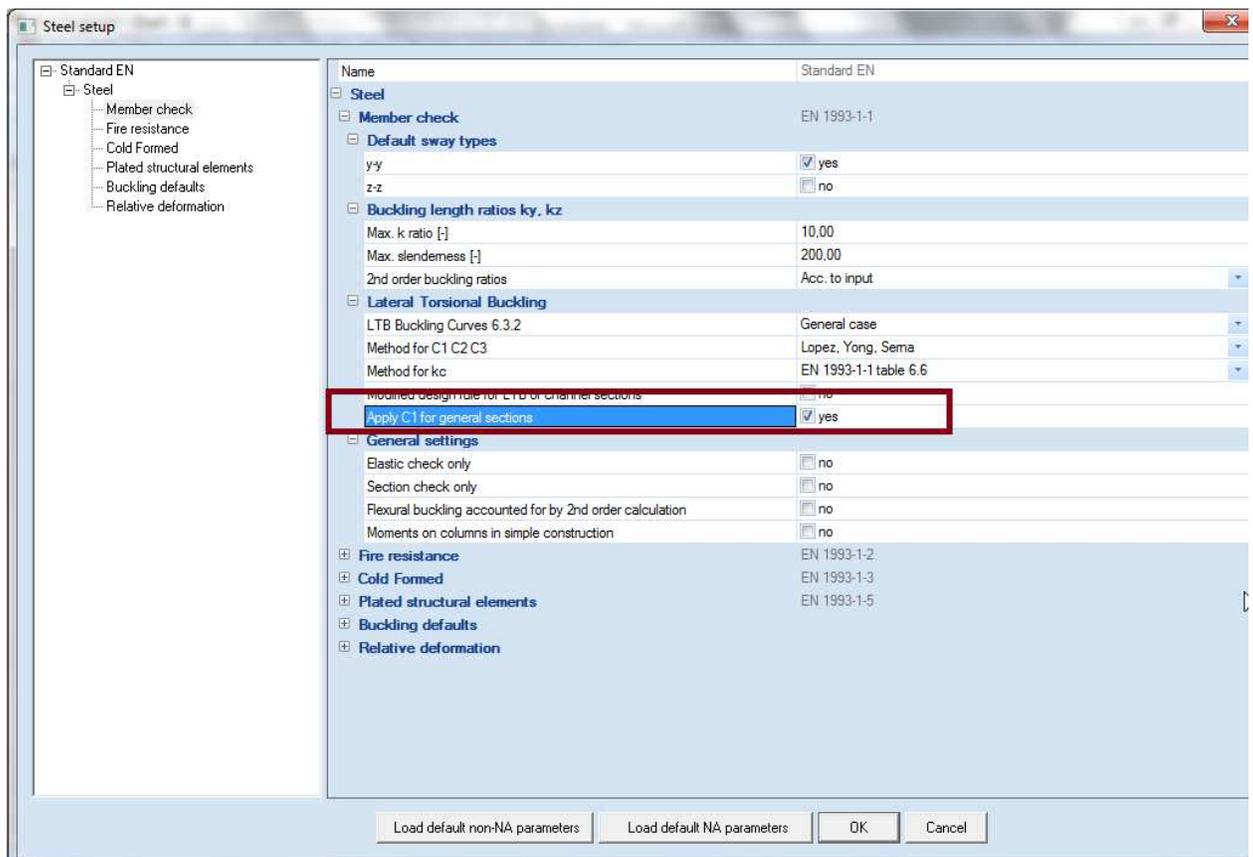
Calcul de M_{cr} pour les sections générales

Pour les **autres sections qui sont supportée**, comme défini ci-dessus, le moment critique élastique pour le déversement M_{cr} est donné par :

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k \cdot L)^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}}$$

avec	E	le module d'élasticité
	G	le module de cisaillement
	$k \cdot L$	la longueur de déversement de la barre entre les points qui ont des appuis de déversement (= l_{LTB}).
	I_w	la constante de gauchissement
	I_t	la constante de torsion
	I_z	le moment d'inertie autour de l'axe faible

Par défaut, la valeur de C_1 n'est pas prise en compte dans le calcul de M_{cr} pour les sections générales. Si l'utilisateur veut le prendre en compte, l'option suivante doit être cochée dans la configuration acier :



Calcul de M_{cr} pour les sections U

Lorsqu'une section U est chargée, de la 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} .

Modified design rule for LTB of Channel sections

In case this setting is activated within the Steel Setup, the reduction factor for Lateral-Torsional Buckling of Channel sections is determined according to Ref.[22].

More specifically the calculation is done as follows:

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

Where: $\Phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{EXTRA} - 0.2) + \lambda_{EXTRA}^2 \right]$ → curve A for channel sections, therefore $\alpha_{LT} = 0.21$

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

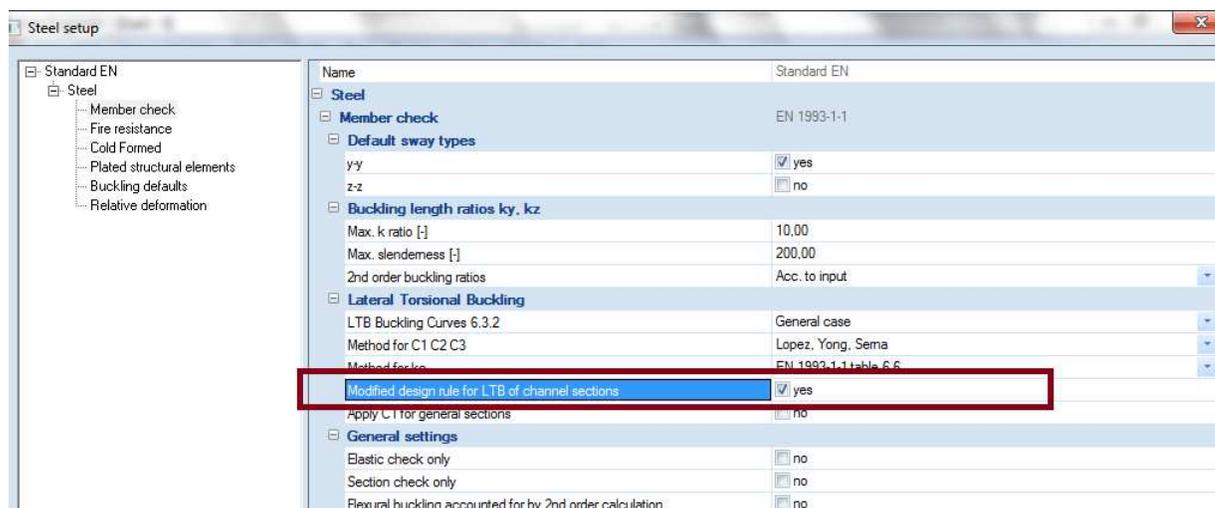
$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{FY}}{M_{\sigma_{LY}}}}$$

$\lambda_T = 1.0 - \lambda_{LT}$	if	$0.5 \leq \lambda_{LT} < 0.80$
$\lambda_T = 0.43 - 0.29\lambda_{LT}$	if	$0.80 \leq \lambda_{LT} < 1.5$
$\lambda_T = 0$	if	$\lambda_{LT} > 1.5$

This Modified design rule is applied only in case the following conditions are met:

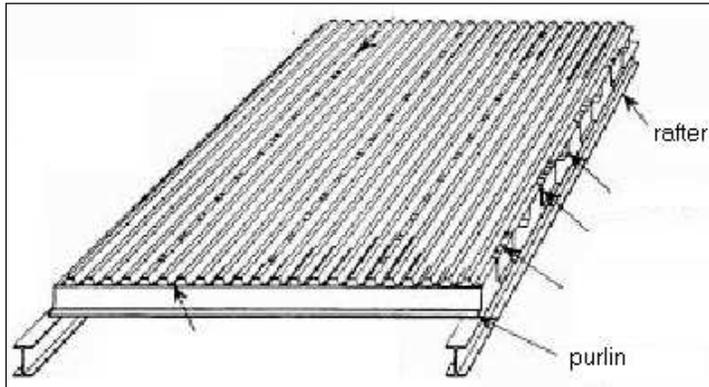
- The section concerns a Channel section (Form Code 5)
- The *General Case* is used for LTB (Not the *Rolled and Equivalent Welded Case*)
- $15 \leq L_{ltb}/h \leq 40$ (with L_{ltb} the LTB length and h the cross-section height)

Si vous voulez utiliser cette méthode dans SCIA Engineer, l'option suivante doit être activée dans la configuration acier :

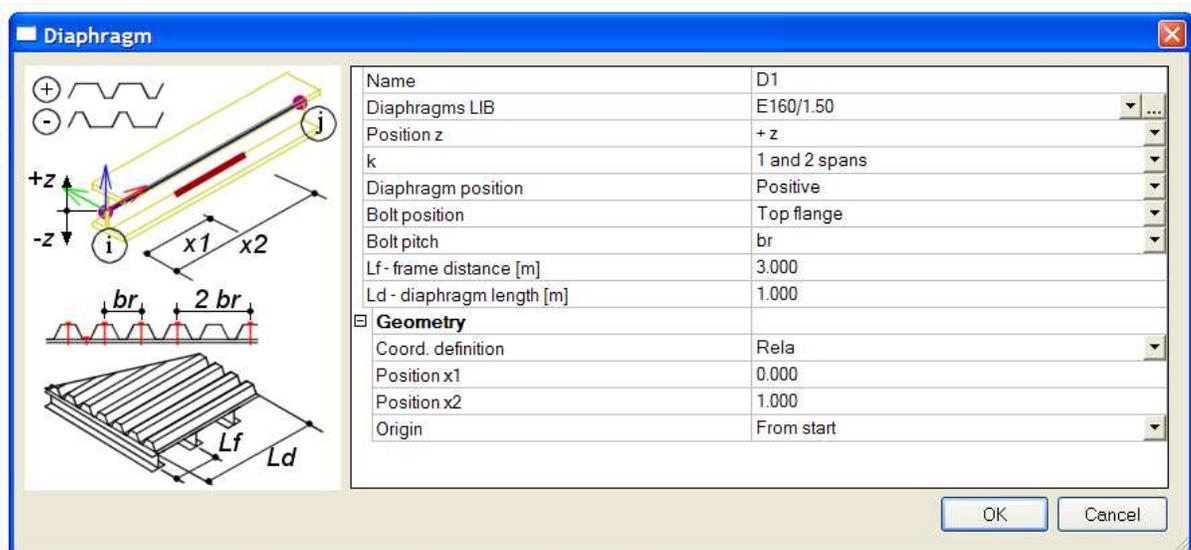


Diaphragmes

Lorsque des diaphragmes (tôle en acier) sont utilisés, la constante de torsion I_t est adaptée pour les sections I symétriques ou asymétriques, sections U, sections Z, sections U, C et Z formées à froid.



Un diaphragme peut être introduit dans SCIA Engineer via "Acier -> Barres -> Données de contrôle d'éléments -> Diaphragmes":



Les configurations pour le diaphragme sont :

- Bibl. Diaphragmes Avec cette option, l'utilisateur peut choisir entre les diaphragmes de la bibliothèque de SCIA Engineer ou d'introduire son propre diaphragme.
- Position z **Un diaphragme est seulement pris en compte du côté en compression de la barre pour le contrôle de déversement.**
- k La valeur du coefficient k dépend du nombre de portées du diaphragme :
- k = 2 pour 1 ou 2 portées,
k = 4 pour 3 ou plus de portées.

Position diaphragme	La position du diaphragme peut être soit positive ou négative. Positive veut dire que le diaphragme est assemblé de telle sorte que la largeur est plus grande du côté supérieur. Négative veut dire que le diaphragme est assemblé de telle sorte que la largeur est plus grande du côté inférieur.
Position boulons	Les boulons peuvent être situés soit sur le côté supérieur ou inférieur du diaphragme.
Pince boulons	Les boulons peuvent être soit : - Sur chaque nervure (i.e. "br"), - Sur une nervure sur deux (i.e. "2 br").
Distance entre portiques	La distance des portiques
Longueur	La longueur du diaphragme (domaine de cisaillement.)

Le diaphragme va seulement avoir une influence sur la constante de torsion I_t et sera pris en compte dans le calcul du M_{cr} pour le contrôle de déversement.

La constante de torsion I_t est adaptée avec la rigidité des diaphragmes :

La valeur pour I_t est égale à la valeur précédente pour I_t (donc I_t pour la barre) plus une rigidité supplémentaire calculée avec les valeurs du diaphragme :

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

Où :

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

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

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

$$C_{\vartheta A,k} = 1.25 C_{100} \left[\frac{b_a}{100} \right] \quad \text{if } 125 < b_a < 200$$

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

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

avec	l	la longueur de déversement
	G	le module de cisaillement
	vor	la rigidité rotationnelle réelle du diaphragme
	hC_{ϑ}	
	$C_{\vartheta M,k}$	la rigidité rotationnelle du diaphragme
	k	
	$C_{\vartheta A,k}$	la rigidité rotationnelle de la connexion entre le diaphragme et la barre
	k	
	$C_{\vartheta P,k}$	la rigidité rotationnelle due à la distorsion de la barre
	k	
	k	coefficient numérique

	= 2 pour une seule ou plusieurs portées du diaphragme
	= 4 pour 3 ou plus de portées du diaphragme
EI_{eff}	rigidité en flexion par unité de largeur du diaphragme
s	espacement de la barre
b_a	la largeur de la semelle de la barre (en mm)
C_{100}	coefficient de rotation – voir tableau
h	hauteur de barre
t	épaisseur de la semelle de la barre
s	épaisseur de l'âme de la barre

Exemple: Diaphragm.esa

Considérons la barre B1 :

- Longueur de déversement = 7 m
- $C1 = 1.13$, $C2 = 0.45$, $C3 = 0.53$
- $M_{cr} = 282$ kNm

Considérons la barre B2

- $I_{t,id} = 10880887$ mm⁴
- Longueur de déversement = 7 m
- $C1 = 1.13$, $C2 = 0.45$, $C3 = 0.53$
- $M_{cr} = 332$ kNm

Les résultats pour le calcul du diaphragme sont affichés dans l'aperçu du contrôle acier sous le contrôle de déversement :

Lateral Torsional Buckling Check

According to article EN 1993-1-1 : 6.3.2.1. and formula (6.54)

LTB Parameters		
Method for LTB curve	Art. 6.3.2.2.	
W_y	1.7020e-03	m ³
Elastic critical moment M_{cr}	405.43	kNm
Relative slenderness λ_{LT}	0.99	
Limit slenderness $\lambda_{LT,0}$	0.40	
LTB curve	b	
Imperfection α_{LT}	0.34	
Reduction factor χ_{LT}	0.60	
Buckling resistance $M_{B,Rd}$	240.51	kNm
c_{0Mk}	2637.60	kNm/m
c_{0Pk}	100.15	kNm/m
c_{0Ak}	23.75	kNm/m
c_{100}	10.00	kNm/m
vorh ck	19.06	kNm/m
Unity check	1.02	-

$$I_{t,id} = 6.6870e-07 + 1.1715e-06 = 1.8402e-06 \quad m^4$$

Mcr Parameters		
LTB length	7.000	m
k	1.00	
k_w	1.00	
C1	1.13	
C2	0.45	
C3	0.53	

Note: C Parameters according to ECCS 119 2006 / Galea 2002 load in center of gravity

Diaphragm data : E160/1.50

Table of values		
I	9.4200e-06	m ⁴
K1	0.17	m/kN
K2	15.70	m ² /kN
Length	3.000	m
frame dist	3.000	m
k	4.00	

assembling: negative way
bolt position : topside
bolt pitch : br

Déversement en utilisant le LTBII – Pas dans l'édition Concept

Cette option a été introduite dans SCIA Engineer comme module séparé et n'est pas incluse dans une édition. Le module nécessaire pour cette option est **esasd.14**.

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

LTBII est l'abréviation de "Lateral Torsional Buckling avec calcul au 2nd ordre".

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

1. Calcul de M_{cr} à travers une solution de valeurs propres
2. Calcul au 2nd ordre incluant les effets de torsion et de gauchissement

Pour les deux méthodes, l'élément qui est considéré est envoyé vers le solveur Frilo LTBII et les résultats respectifs sont renvoyés vers SCIA Engineer.

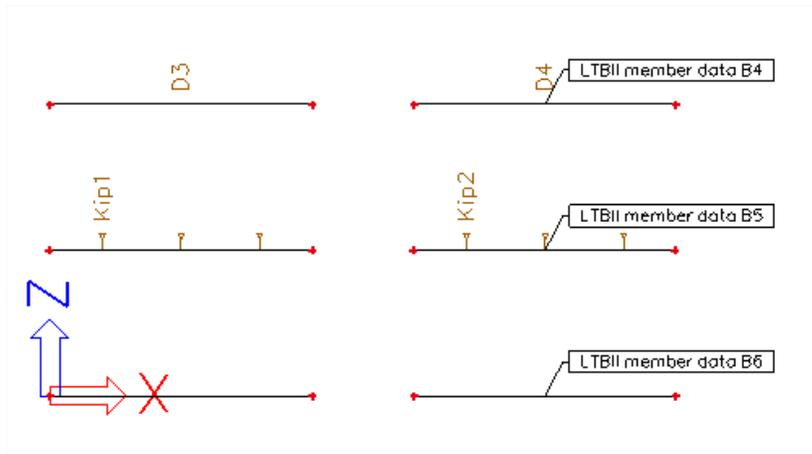
L'élément est isolé de la structure et considéré comme une barre seule, avec:

- Conditions appropriées pour la torsion et le gauchissement
- Forces aux extrémités
- Chargements
- Appuis intermédiaires (diaphragmes, appuis de déversement)

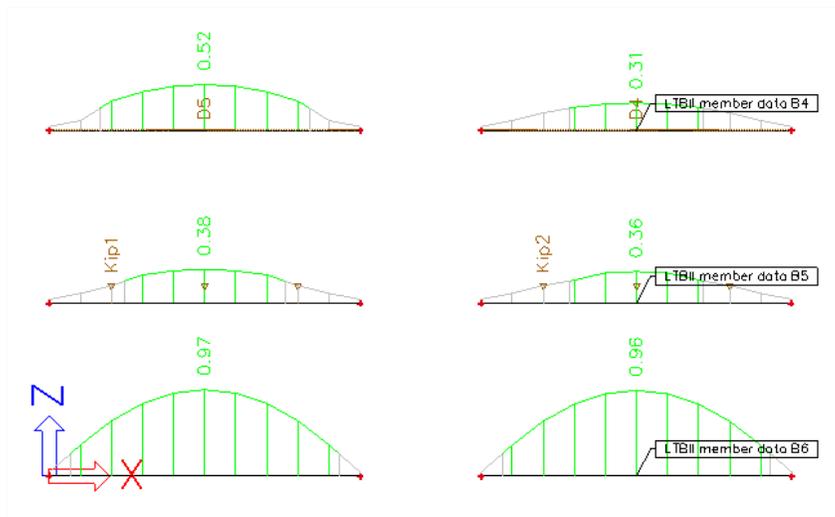
Pour utiliser cette option dans SCIA Engineer, la fonctionnalité "LTB 2nd ordre" doit être activée. Ensuite avec l'option "Acier -> Barres -> Données de contrôle d'éléments -> Données de barre LTBII" l'utilisateur peut introduire des données LTB sur une barre.

Exemple: LTBII.esa

Dans cet exemple, la même barre sera calculée avec et sans des données LTBII dans trois configurations :



Lorsque vous regardez le contrôle pour LC1, il n'y a pas de grande différence entre les barres avec ou sans les données LTBII :

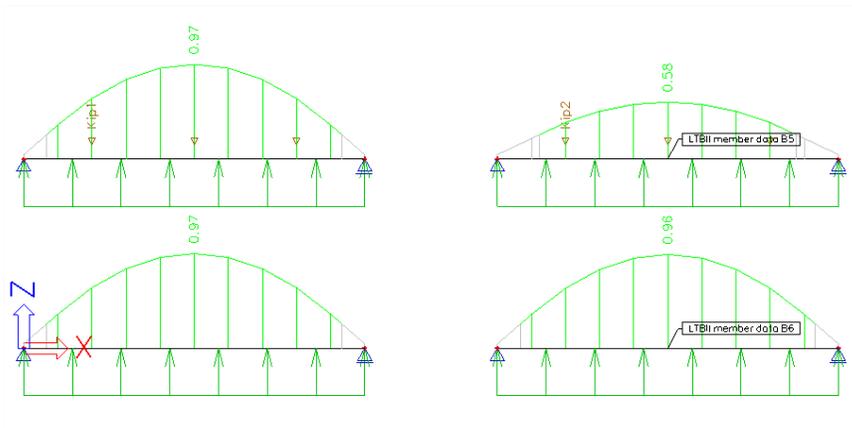


Les résultats de calcul avec les données LTBII sont seulement favorables avec le diaphragme.

Dans SCIA Engineer, le calcul d'un diaphragme est un calcul dans une seule direction.

Dans Frilo, la rigidité du diaphragme pour rotation et la translation est prise en compte, ce qui donne une rigidité plus grande du diaphragme et donc un meilleur contrôle unité.

En regardant les résultats pour le Cas de charge LC2, la direction de la charge répartie est modifiée. Le côté supérieur des barres est en tension pour ce cas de charge. SCIA Engineer ne prend pas en compte les appuis de déversement ou un diaphragme sur le côté en tension. Mais Frilo peut prendre cela aussi en compte. Les appuis et le diaphragme aura une plus petite influence que sur le côté en compression, mais il y aura une augmentation de la rigidité :



Ce calcul est aussi indiqué dans la sortie détaillée :

Lateral Torsional Buckling Check

According to article EN 1993-1-1 : 6.3.2.1. and formula (6.54)

LTB Parameters		
Method for LTB curve	Art. 6.3.2.3.	
Wy	1.6640e-04	m ³
Elastic critical moment M _{cr}	27.05	kNm (according to FRILO LTB solver)
Relative slenderness Lambda _{LT}	1.30	
Limit slenderness Lambda _{LT,0}	0.40	
LTB curve	b	
Imperfection Alpha _{LT}	0.34	
Beta	0.75	
Reduction factor Chi _{LT}	0.52	
Correction factor k _c	0.94	
Correction factor f	0.99	
Modified reduction factor Chi _{LT,mod}	0.53	
Buckling resistance Mb.R _d	24.31	kNm
Unity check	0.58	-

M _{cr} Parameters		
LTB length	7.200	m

Contrôle de compression et de flexion

Le contrôle de compression et de flexion pour un élément sera exécuté selon l'EN 1993-1-1 **art. 6.3.2.**

A moins qu'une analyse au second ordre soit effectuée, les éléments qui sont soumis à la flexion et à la compression axiale combinés doivent satisfaire :

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

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

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ sont les valeurs de dimensionnement de la force de compression et les moments **maximaux** autour de l'axe y-y et z-z sur la longueur de l'élément respectivement.

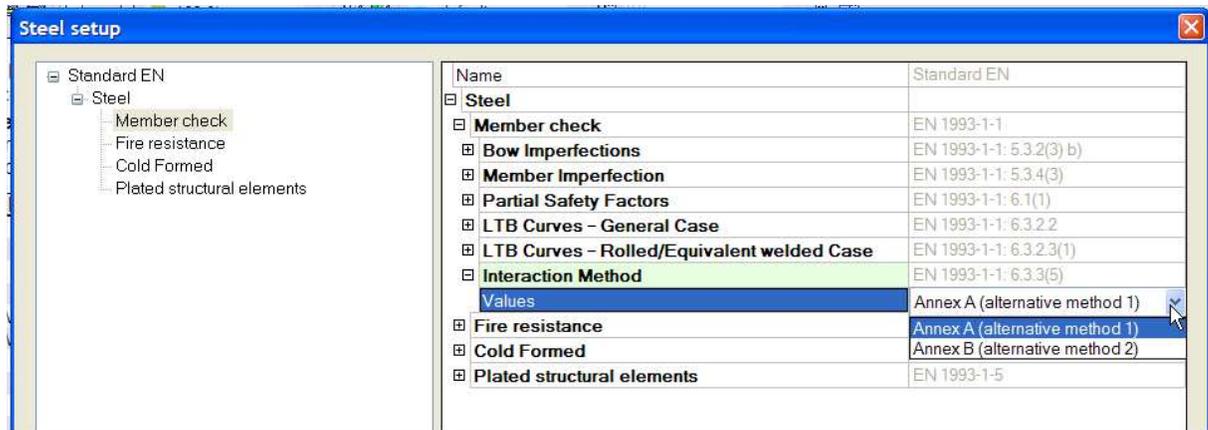
χ_y et χ_z sont les coefficients de réduction dus au flambement par flexion

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

Class	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	W_{ply}	W_{ply}	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
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	$e_{N,z} N_{Ed}$

Les coefficients d'interaction k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} and k_{zz} ont été dérivés de l'EN 1993-1-1 Annexe A (méthode alternative1) ou à partir de l'Annexe B (méthode alternative2).

Le choix entre la Méthode d'interactions 1 ou 2 peut être fait dans SCIA Engineer dans les paramètres de l'Annexe Nationale :



Exemple: Industrial Hall.esa

Considérons le poteau B28 (pour la combinaison CO1-ULS).

Dans SCIA Engineer, toutes les formules calculées sont d'abord présentées selon l'EN 1993 Annexe 1 :

Compression and bending check

According to article EN 1993-1-1 : 6.3.3. and formula (6.61), (6.62)
Interaction Method 1

Table of values		
k _{yy}	0.978	
k _{yz}	0.837	
k _{zy}	0.943	
k _{zz}	0.807	
Delta My	0.00	kNm
Delta Mz	0.00	kNm
A	1.5269e+04	mm ²
W _y	4.1630e+06	mm ³
W _z	3.9265e+05	mm ³
NRk	3588.20	kN
M _{y,Rk}	978.31	kNm
M _{z,Rk}	92.27	kNm
M _{y,Ed}	-720.73	kNm
M _{z,Ed}	-0.25	kNm
Interaction Method 1		
Mcr0	965.61	kNm
reduced slenderness 0	1.01	
C _{my,0}	0.787	
C _{mz,0}	0.782	
C _{my}	0.958	
C _{mz}	0.782	
C _{mLT}	1.000	
μ _{uy}	0.996	
μ _{uz}	0.960	
w _y	1.146	
w _z	1.500	
n _{pl}	0.045	
a _{LT}	0.999	
b _{LT}	0.001	
c _{LT}	1.192	
d _{LT}	0.002	
e _{LT}	0.588	
C _{yy}	0.989	
C _{yz}	0.439	
C _{zy}	0.946	
C _{zz}	0.990	

Ensuite, le contrôle est donné comme étant deux fois une somme de trois valeurs comme dans les formules (6.61) et (6.62) de l'EN 1993-1-1:

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

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

Dans SCIA Engineer :

Unity check (6.61)	= 0.05 + 0.96 + 0.00 = 1.02
Unity check (6.62)	= 0.10 + 0.92 + 0.00 = 1.03

Contrôle de flambement par cisaillement – EN 1993-1-5

Général

Le contrôle de flambement par cisaillement permet de vérifier si l'âme de la section droite peut flamber localement.

Ce contrôle n'est pas inclus dans l'EN 1993-1-1, mais dans l'EN 1993-1-5: Conception des structures en acier – Partie 1-5 : Plaques planes.

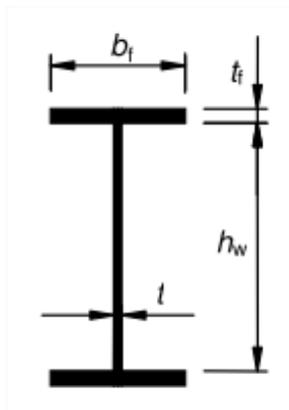
Il sera d'abord contrôlé si l'élanement est plus faible qu'une certaine valeur, parce que pour les âmes avec une petite valeur d'élanement, ce contrôle ne doit pas être exécuté.

Pour les plaques avec h_w/t plus grand que $72\varepsilon/\eta$ pour une âme sans raidisseur la résistance au cisaillement doit être contrôlée.

Avec :

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

η sera défini dans l'Annexe Nationale. La valeur $\eta = 1.20$ est recommandée pour les nuances d'acier qui vont jusqu'à et incluent S460. Pour des nuances plus grandes $\eta = 1.00$ est recommandé.



Si l'élanement est plus grand que la valeur minimum, le contrôle du flambement par cisaillement est exécuté selon l'EN 1993-1-5, formule (5.10) (ceci est un contrôle sur l'effort de cisaillement) et la formule (7.1) (qui est le contrôle sur l'interaction entre l'effort de cisaillement, le moment de flexion et l'effort axial). Les deux formules sont contrôlées dans SCIA Engineer.

Exemple: Industrial Hall.esa

Considérons la barre B50

Il s'agit d'un profilé IPE 160 : $h_w = 160 - 2 \times 7.40 = 145.2$ mm. et $t = 5$ mm

$$\Rightarrow h_w / t = 29.04$$

Cela doit être contrôlé avec la valeur : $72\varepsilon/\eta = 72 \times 1.00 / 1.2 = 60$

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

\Rightarrow Le contrôle de flambement au cisaillement ne doit pas être exécuté.

Cela est aussi indiqué dans SCIA Engineer :

Shear buckling check

in buckling field 1

According to article EN 1993-1-5 : 5. & 7.1. and formula (5.10) & (7.1)

Table of values	
hw/t	29.040

The web slenderness is such that the Shear Buckling Check is not required.

Considérons la barre B28 (pour la combinaison CO1-ULS):

Il s'agit d'un profilé IPE750x137 : $h_w = 753 - 2 \times 17 = 719$ mm. et $t = 11.5$ mm

$$\Rightarrow h_w / t = 62.52$$

Cela doit être comparé avec la valeur : $72\varepsilon/\eta = 72 \times 1.00 / 1.2 = 60$

$$\Rightarrow h_w / t > 72\varepsilon/\eta$$

⇒ Le contrôle du flambement par cisaillement doit être exécuté.

Shear buckling check

in buckling field 1

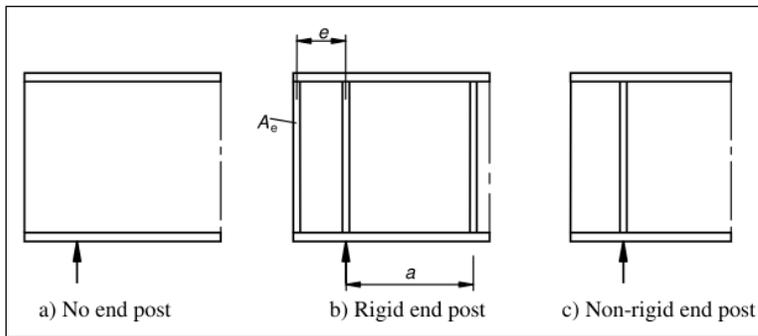
According to article EN 1993-1-5 : 5. & 7.1. and formula (5.10) & (7.1)

Table of values		
a	6.900	m
hw	719.00	mm
t	11.50	mm
fyw	235.0	MPa
Eta	1.20	
k tau	5.34	
Sigma E	48.6	MPa
tau cr	259.3	MPa
Chi w	1.15	
bf	263.00	mm
tf	17.00	mm
a	1.866	m
Mf,Rd	713.90	kNm
Chi f	0.01	
Chi V	1.15	
Vb,Rd	1294.83	kN
Eta 3	0.08	
Eta 1	0.35	
Mpl,Rd	1143.28	kNm

Unity check 0.08 (5.10)

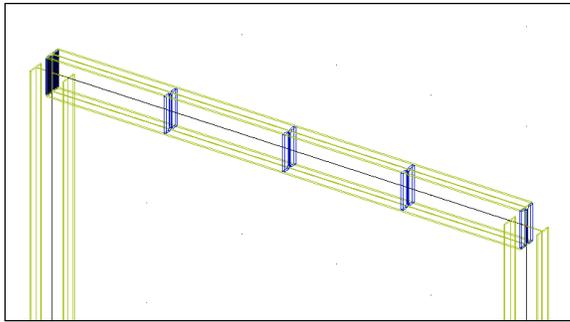
Raidisseurs

Dans l'EN 1993-1-5, Figure 5.1 les définitions des raidisseurs sur un élément sont donnés :



Ces raidisseurs vont influencer la longueur totale pour le flambement par cisaillement. Dans SCIA Engineer aussi, ces raidisseurs peuvent être introduits sur une barre et auront seulement une influence sur le contrôle du flambement par cisaillement.

Ces raidisseurs peuvent être introduits "Acier -> Barres -> Données de contrôle d'élément -> Raidisseurs".

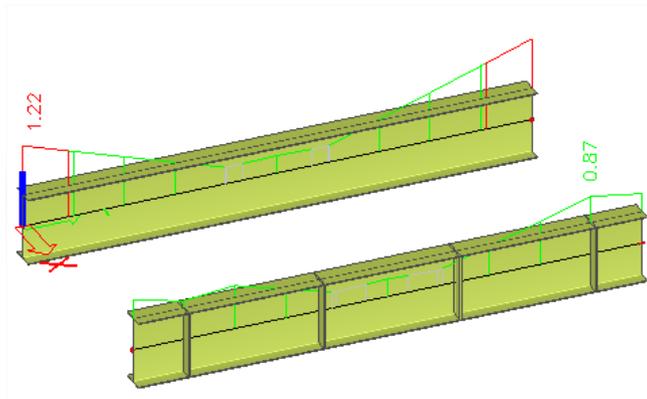


Les raidisseurs définissent les dimensions de domaine (a,d) qui sont seulement pertinents pour le contrôle de flambement par cisaillement. Lorsqu'aucun raidisseur n'est défini, la valeur de 'a' est prise égale à la longueur de l'élément.

Exemple: Stiffeners.esa

Dans cet exemple, deux barres identiques sont introduites. B1 sans raidisseurs et B2 avec raidisseurs :

Comparons maintenant le contrôle de flambement par cisaillement avec et sans raidisseurs :



Sans raidisseurs**Contrôle de flambement par cisaillement :**

Table of values		
a	6.000	m
hw	782.00	mm
t	5.00	mm
fyw	235.0	MPa
Eta	1.20	
k tau	5.34	
Sigma E	7.8	MPa
tau cr	41.4	MPa
Chi w	0.46	
bf	275.00	mm
tf	9.00	mm
a	1.570	m
Mf,Rd	478.91	kNm
Chi f	0.00	
Chi V	0.46	
Vb,Rd	245.31	kN
Eta 3	1.22	
Eta 1	0.53	
Mpl,Rd	693.57	kNm

Unity check 1.22 (5.10)

Unity check 1.17 (7.1)

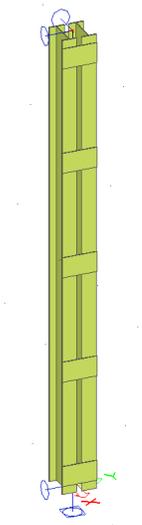
Avec raidisseurs**Contrôle de flambement par cisaillement :**

Table of values		
a	1.600	m
hw	782.00	mm
t	5.00	mm
fyw	235.0	MPa
Eta	1.20	
k tau	6.30	
Sigma E	7.8	MPa
tau cr	48.9	MPa
Chi w	0.50	
bf	275.00	mm
tf	9.00	mm
a	0.419	m
Mf,Rd	478.91	kNm
Chi f	0.02	
Chi V	0.52	
Vb,Rd	275.62	kN
Eta 3	0.87	
Eta 1	0.24	
Mpl,Rd	693.57	kNm

Unity check 0.87 (5.10)

Unity check 0.41 (7.1)

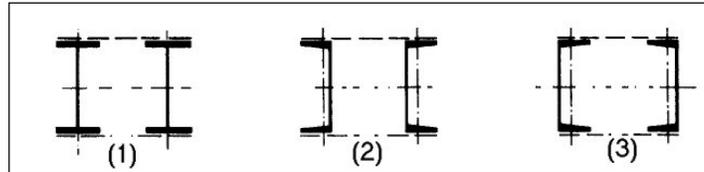
Contrôle ELU pour les barres composées en compression



Ce contrôle est exécuté selon l'EC-ENV et l'EC-EN 11993-1-1 art.6.4

Les sections paires suivantes sont supportées pour ce contrôle :

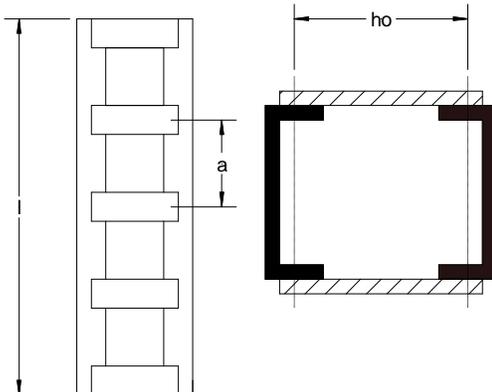
- (1) 2I
- (2) 2Uo
- (3) 2Uc



Deux liaisons sont utilisées.

Les contrôles additionnels suivants sont effectués :

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



Exemple – calcul manuel d'une barre composée en compression

EC_EN_Battened_Compression_Members_I.esa

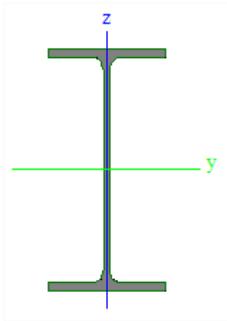
Considérons l'élément B1

Sur cette barre, seule une force de compression de 500kN est appliquée

Propriétés de la membrure :

Division	4
Distance from begin x [m]	0.200
Distance from end x' [m]	0.200
Width of link w [m]	0.220
Thickness t [mm]	7.00
On begin	<input checked="" type="checkbox"/>
On end	<input checked="" type="checkbox"/>

Propriétés du profilé IPE 330



Property	
A [mm ²]	6.2600e+03
Ay [mm ²]	3.2283e+03
Az [mm ²]	2.3645e+03
AL [m ² /m]	1.2540e+00
It [mm ⁴]	2.8150e+05
Iy [mm ⁴]	1.1770e+08
Iz [mm ⁴]	7.8810e+06
Iw [mm ⁶]	1.9910e+11
alpha [deg]	0.00
Wely [mm ³]	7.1310e+05
Welz [mm ³]	9.8520e+04
Wply [mm ³]	8.0430e+05
Wplz [mm ³]	1.5370e+05
cYLCS [mm]	80.00
cZLCS [mm]	165.00

Valeurs dans SCIA Engineer:

Check for battened compression member

Table of values		
l	4600.00	mm
a	1150.00	mm
h0	210.00	mm
Ich	7.8810e+06	mm ⁴
Lambda	41.50	
Mu	1.00	
Ach	6.2600e+03	mm ²
Ieff	1.5380e+08	mm ⁴
Sv	24384.44	kN
e0	9.20	mm
MEd,l	0.00	kNm
MEd	4.86	kNm
VEd	3.32	kN

Calcul manuel de ces valeurs :

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

a distance entre les membrures = l / (nombre de divisions) = 4600mm / 4 = 1150 mm

h0 distance entre les centres de gravité des membrures = 210mm

Ich Iz du profilé IPE330

Ach aire d'un profilé I, A de l'IPE 330

$\lambda = l / i_0 = 4600\text{mm} / 110,833 \text{ mm} = 41.5$

avec

$$I_1 = 0.5 \cdot h_0^2 \cdot Ach + 2 \cdot Ich$$

$$= 0.5 \cdot (210\text{mm})^2 \cdot (6260\text{mm}^2) + 2 \cdot (7881000\text{mm}^4) = 1.538 \times 10^8 \text{mm}^4$$

$$i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2 \cdot Ach}} = \sqrt{\frac{1.538 \times 10^8 \text{mm}^4}{2 \cdot 6260\text{mm}^2}} = 110,833\text{mm}$$

Mu μ :

= 0 if $\lambda \geq 150$

= $2 - \frac{\lambda}{75}$ if $75 < \lambda < 150$

= 1.0 if $\lambda \leq 75$

Et Lambda = 41.5 < 75 dans cet exemple => $\mu = 1.00$

$$\begin{aligned} \text{leff} &= 0.5 \cdot h_0^2 \cdot Ach + 2 \cdot \mu \cdot Ich \\ &= 0.5 \cdot (210\text{mm})^2 \cdot (6260\text{mm}^2) + 2 \cdot (1.00) \cdot (7881000\text{mm}^4) = 1.538 \times 10^8 \text{mm}^4 \end{aligned}$$

$$Sv = \frac{24 \cdot E \cdot Ich}{a^2 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot Ich \cdot h_0}{n \cdot Ib} \cdot \frac{h_0}{a}\right)} \text{ but } Sv \leq \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot Ich}{a^2}$$

Avec :

n = nombre de plans des traverses de liaison : n=2

$$\begin{aligned} Ib &= (\text{épaisseur de traverse}) \times (\text{largeur de traverse})^3 / 12 = (7 \text{ mm}) \times (220 \text{ mm})^3 / 12 \\ &= 6,211 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\frac{24 \cdot E \cdot Ich}{a^2 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot Ich \cdot h_0}{n \cdot Ib} \cdot \frac{h_0}{a}\right)} = \frac{24 \cdot \left(\frac{210000\text{N}}{\text{mm}^2}\right) \cdot (7881000\text{mm}^4)}{(1150\text{mm})^2 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot (7881000\text{mm}^4) \cdot 210\text{mm}}{2 \cdot (6,211 \times 10^6 \text{mm}^4) \cdot 1150\text{mm}}\right)} = 2.438 \times 10^4 \text{ kN}$$

Et

$$\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot Ich}{a^2} = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{210000\text{N}}{\text{mm}^2}\right) \cdot (7881000\text{mm}^4)}{(1150)^2} = 2.470 \times 10^4 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow Sv = 2.438 \times 10^4 \text{ kN}$$

$$e_0 = l/500 = 4600\text{mm}/500 = 9.2 \text{ mm}$$

MEd,I Mz dans la section considérée = 0 kNm

MEd sera calculé comme suit :

$$\text{if } \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{Sv}\right) > 0 \Rightarrow MEd = \frac{N_{Ed} \cdot e_0 + MEd_I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{Sv}}$$

$$\text{Sinon : } \Rightarrow Med = 1 \times 10^6 \text{ kNm}$$

Avec :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{eff}}{l^2} = \frac{\pi^2 \cdot \left(\frac{210000\text{N}}{\text{mm}^2}\right) \cdot (1.538 \times 10^8 \text{mm}^4)}{(4600\text{mm})^2} = 15064 \text{ kN}$$

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

$$\Rightarrow MEd = \frac{N_{Ed} \cdot e_0 + MEd_I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{Sv}} = \frac{500\text{kN} \cdot 9.2\text{mm} + 0\text{kNm}}{0.9466} = 4860\text{kNmm} = 4,860\text{kNm}$$

$$VEd = \frac{\pi \cdot MEd}{l} = \frac{\pi \cdot 4860\text{kNmm}}{4600\text{mm}} = 3,32\text{kN}$$

Contrôle de membrure comme barre entre deux traverses

Check of chord as beam in field between battens

According to article EN 1993-1-1: 6.4.3.1 & 6.2.9.1 and formula (6.42)

Table of values		
NG	270.78	kN
VG	1.66	kN
MG	0.95	kNm
Unity check	0.19	-

Le contrôle de la membrure sera exécuté avec un contrôle en section selon l'EN 1993-1-1 pour le profilé de membrure avec les efforts internes suivant sur une seule traverse :

$$NG = N_{\text{Chord}} = 0.5 \cdot N_{Ed} + \frac{M_{Ed} \cdot h_0 \cdot Ach}{2 \cdot I_{eff}} = 0.5 \cdot 500\text{kN} + \frac{(4860\text{kNmm}) \cdot (210\text{mm}) \cdot (6260\text{mm}^2)}{2 \cdot 1.538 \times 10^8 \text{mm}^4} = 270,78 \text{ kN}$$

$$VG = VEd / 2 = 3,32\text{kN} / 2 = 1,66\text{kN}$$

$$MG = \frac{V_{ed} \cdot a}{4} = \frac{3,32\text{kN} \cdot 1150\text{mm}}{4} = 0.95\text{kNm}$$

Pour une section I, une classification est faite, pour une section U, un contrôle élastique est fait.

Ce contrôle en section va donner un contrôle unité de **0,19**

Contrôle au flambement de la membrure

Buckling check of chord

According to article EN 1993-1-1: 6.4.3.1 & 6.3.1.1 and formula (6.46)

Table of values		
Nch,Ed	270.78	kN
Buckling length	1150.00	mm
Slenderness	32.41	
Relative slenderness Lambda	0.37	
Buckling curve	b	
Imperfection Alpha	0.34	
Reduction factor Chi	0.94	
Unity check	0.17	-

Nch,Ed = NChord = 170,78 kN (voir le contrôle de Contrôle de membrure comme barre entre deux traverses)

Longueur de flambement = a

$$\text{Elancement} = \frac{\text{Buckling length}}{\sqrt{\frac{I_{ch}}{A_{ch}}}} = \frac{1150\text{mm}}{\sqrt{\frac{7881000\text{mm}^4}{6260\text{mm}^2}}} = 32,411$$

$$\text{Elancement relatif} \sqrt{\frac{A_{ch} \cdot f_y}{N_{cr_z}}} = \sqrt{\frac{6260\text{mm}^2 \cdot \frac{275\text{N}}{\text{mm}^2}}{12351000\text{N}}} = 0.373$$

Avec :

$$N_{cr_z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{ch}}{(\text{Buckling length})^2} = \frac{\pi^2 \cdot \left(\frac{210000\text{N}}{\text{mm}^2}\right) \cdot (7881000\text{mm}^4)}{(1150\text{mm})^2} = 12351\text{ kN}$$

Courbe de flambement = b, ceci est la courbe de flambement pour l'IPE 330 autour de l'axe z

L'imperfection alpha pour la courbe de flambement b = 0.34

Coefficient de réduction Chi peut être calculé comme expliqué dans le contrôle de flambement.

$$\text{Contrôle unité} = \frac{N_{chEd}}{N_{bRd}} = \frac{270,78\text{kN}}{1618,2\text{kN}} = 0.17$$

Avec:

$$N_{b,Rd} = \text{reduction factor Chi} \frac{A_{ch} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0.94 \frac{6260\text{mm}^2 \cdot 275\text{N/mm}^2}{1.00} = 1618,21\text{ kN}$$

Contrôle de traverse :

Check of batten

According to article EN 1993-1-1: 6.4.3.1, 6.2.9.2 & 6.2.6 and formula (6.42), (6.19)

Table of values		
t	7.00	mm
b	220.00	mm
T	9.09	kN
MG	0.95	kNm
Sigma	16.9	MPa
Unity check	0.06	-
Tau	5.9	MPa
Unity check	0.04	-

t épaisseur de traverse

b largeur de traverse

$$T = \frac{VEd \cdot a}{h_0 \cdot 2} = \frac{3,32kN \cdot 1150mm}{210mm \cdot 2} = 9,09kN$$

$$MG = 0,954 \text{ kNm (voir le contrôle précédent)}$$

$$\text{Sigma} = \frac{MG \cdot b/2}{Ib} = \frac{954000Nmm \cdot 220mm/2}{6,211 \cdot 10^6 mm^4} = 16,9MPa$$

(Calcul de Ib voir calcul de Sv dans les propriétés)

$$\text{Contrôle unité sigma:} = \frac{\text{Sigma}}{\frac{fy}{\gamma_{M0}}} = \frac{16,9MPa}{\frac{275N/mm^2}{1,00}} = 0,06$$

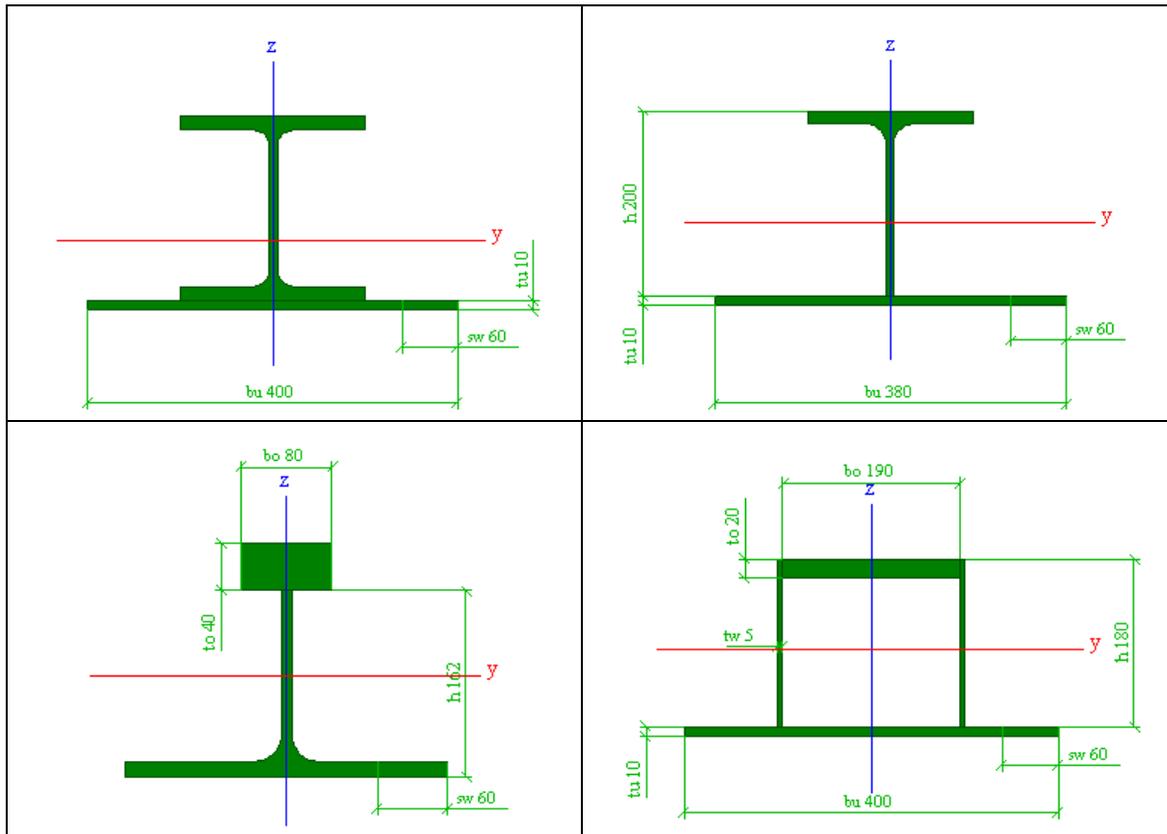
$$\text{Tau} = \frac{T}{b \cdot t} = \frac{9090N}{220mm \cdot 7mm} = 5,9MPa$$

$$\text{Contrôle unité Tau:} = \frac{\text{Tau}}{\frac{fy/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}}} = \frac{5,9MPa}{\frac{275N/mm^2/\sqrt{3}}{1,00}} = 0,04$$

ULS Check for Built-in beams

The built-in beams are of the types SFB (Slim Floor Beam), IFB (Integrated Floor Beam) or THQ (Top Hat Beams).

La classification de section selon la norme appropriée est exécutée. La classification pour les classes 1, 2, 3 et 4 est supportée. Pour le contrôle ELU, la flexion locale de la plaque est prise en compte pour la capacité de moment plastique et les contraintes de flexion dans la section. Le chargement de déséquilibre est contrôlé.



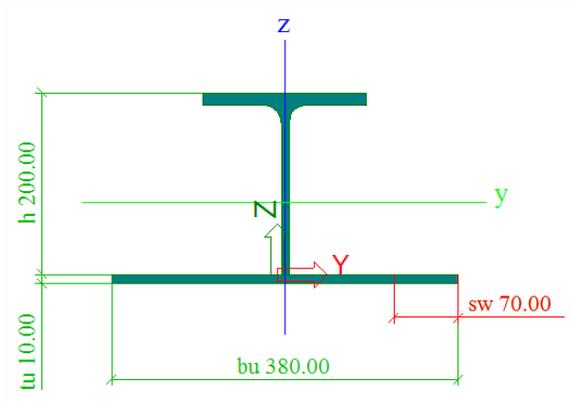
Ce contrôle de déséquilibre a été introduit par un coefficient "Q".

En introduisant une charge linéaire sur une telle section, l'option "Semelle inférieure" peut être contrôlée et ensuite un coefficient Q (un coefficient de déséquilibre) peut être introduit dans la fenêtre de propriété de la charge linéaire. Ce coefficient Q indique la distribution de la force :

$$Q = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\max} + q_{\min}}$$

Si $Q = 0$, les deux côtés sont chargés de façon équivalente, $Q=1$: un côté est chargé, l'autre côté ne l'est pas.

La position de la charge est indiquée dans la bibliothèque de section par la valeur s_w :

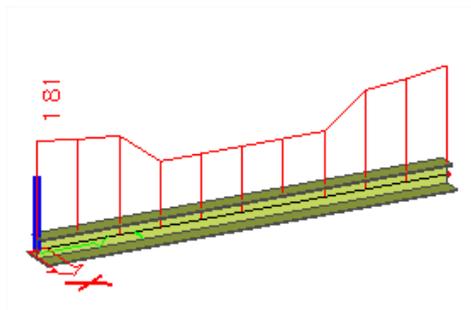


Exemple: Built-in beams.esa

Dans cet exemple, une barre avec un profil IFB a été introduite avec une charge linéaire de 100kN/m et un coefficient de déséquilibre Q=0.8 :

Properties	
Line force on beam (1)	
Name	LF1
Direction	Z
Type	Force
Angle [deg]	
Distribution	Uniform
Value - P [kN/m]	-50.00
Bottom flange	<input checked="" type="checkbox"/>
Q - factor	0.8

Dans le contrôle acier, le contrôle de déséquilibre est donné :



Section check inclusive local q loading

according to ECCS No.83 "Design Guide for Slim Floors with Built-in Beams"

Table of values		
q max	45.00	kN/m
q min	5.00	kN/m
e1	286.67	mm
e2	0.00	mm
bu	380.00	mm
tu	10.00	mm
bo	180.00	mm
to	13.50	mm
hf	198.25	mm
bf	0.00	mm

Normal stress check according to formula (5.15)

Table of values		
Sigma x	-70.25	MPa
Sigma y	387.00	MPa
unity check	1.81	

Shear stress check

Table of values		
Sigma x	-75.33	MPa
Tau	6.75	MPa
unity check	0.32	

Torsion check according to formula (4.15)

Table of values		
e	143.33	mm
Q	40.00	kN/m
L	4.00	m
Lk	2.91	m
Io	6561000.00	mm ⁴
Mt,max	4.13	kNm
Mw,max	7.34	kNm
Tau t max	176.05	MPa
Tau w max	22.86	MPa
unity check	1.47	

Optimisation

Dans SCIA Engineer, il y a deux manières de faire une optimisation :

1. Optimisation de Section droite : Optimisation d'une section droite choisie.
2. Optimisation générale : Optimisation d'une ou de plusieurs (ou toutes) les sections en même temps.

Les deux options sont expliquées dans les deux paragraphes suivants.

Optimisation de section droite

Avec cette option, l'utilisateur peut optimiser une section droite pour le contrôle acier. Cela sera expliqué dans l'exemple ci-dessous.

Exemple: Optimisation.esa

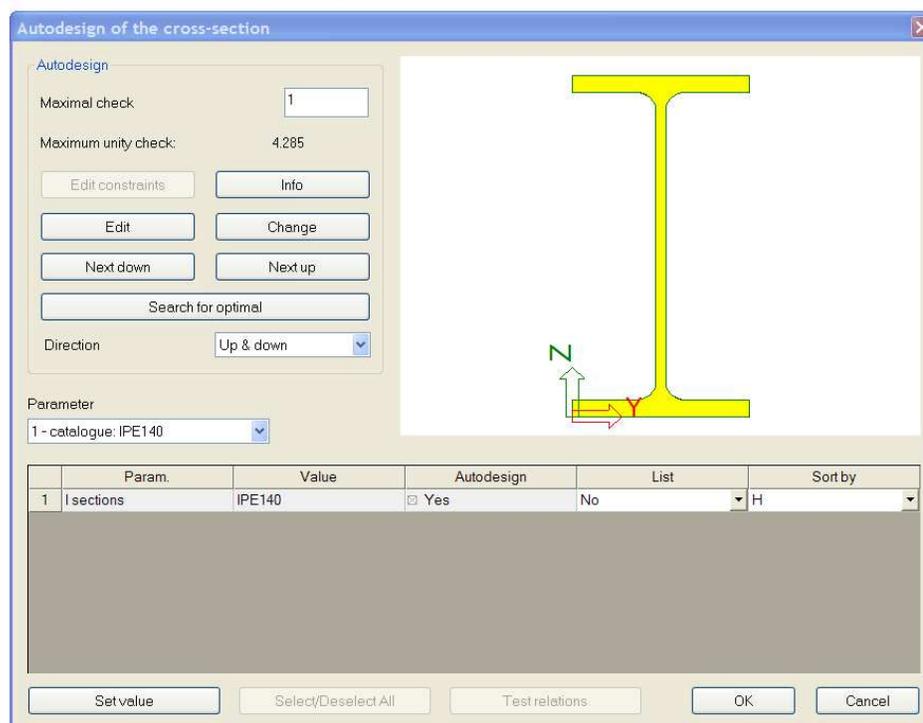
L'optimisation peut être faite via "Acier -> Barres -> Contrôles ELU -> Contrôle". Le contrôle Acier doit d'abord être calculé, cliquez donc d'abord sur "Régénérer".

Lorsque vous cliquez maintenant sur "Autodesign", SCIA Engineer vous donnera le message suivant :



Et dans la fenêtre des propriétés l'option pour "Filtre" a été mise sur "Profil". Choisissez maintenant le profil IPE 140 et cliquez encore une fois sur "Régénérer" et ensuite sur "Autodesign".

Maintenant la fenêtre "Autodesign de la section droite" va s'ouvrir :



Vous pouvez d'abord introduire la valeur du contrôle max. Normalement cela est le contrôle unité de 1.00.

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

Lorsque vous cliquez sur "Optimisation automatique", SCIA Engineer va vous proposer le profilé IPE le plus petit qui pourra résister aux efforts internes calculés.

Dans cet exemple un IPE 200 sera trouvé. Lorsque vous cliquez sur "OK" maintenant, SCIA Engineer va remplacer automatiquement ce profil IPE140 par un profil IPE200.

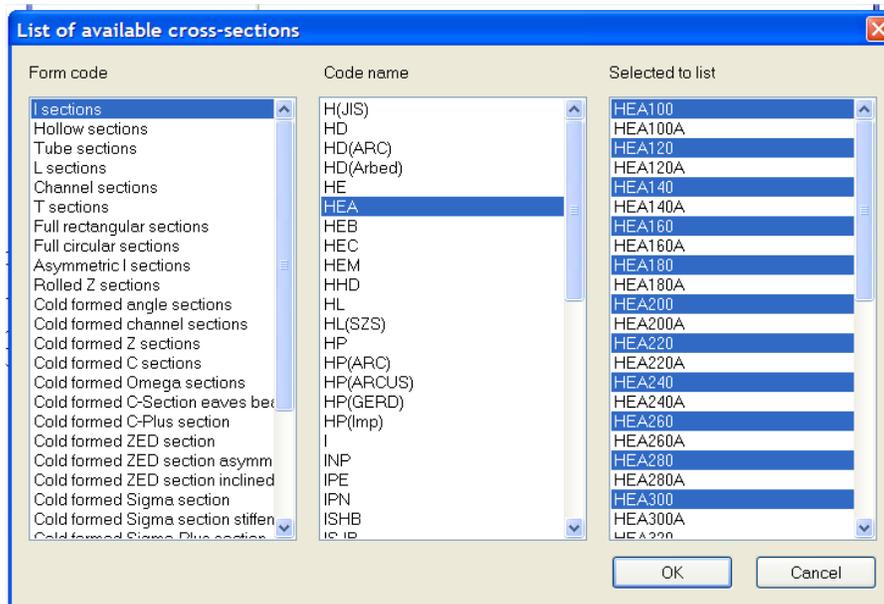
Le contrôle acier de ce profil IPE200 est maintenant exécuté avec les efforts internes calculés avec les propriétés du profil IPE140. Le poids propre par exemple ne sera pas pris en compte correctement. Le projet doit donc être recalculé avant d'accepter ces résultats de contrôle unité.

Il est aussi possible d'utiliser une **liste de sections**.

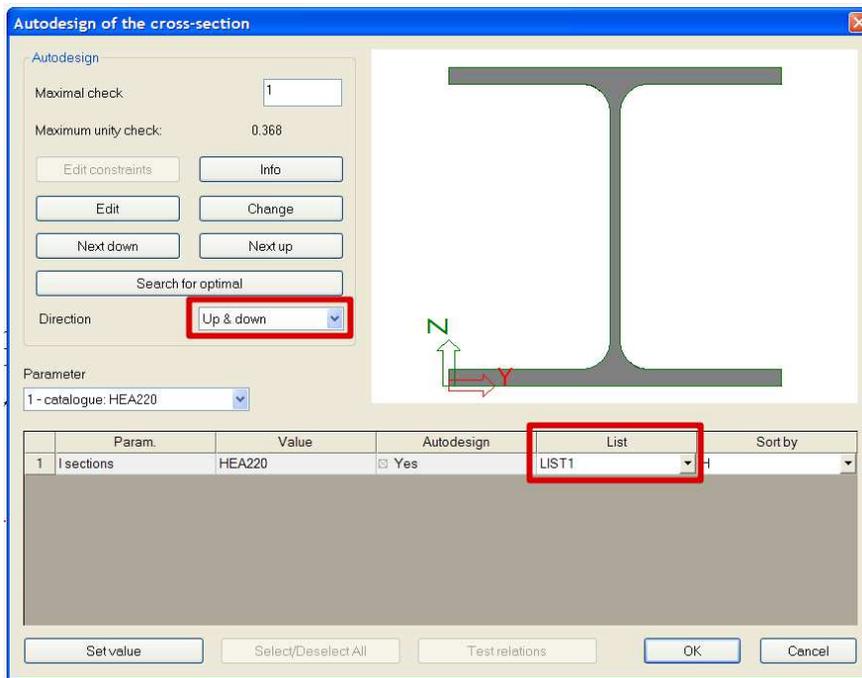
Avec cette liste, il est possible d'indiquer quelles sections peuvent être utilisées ou pas. Par exemple la section IPE140A peut être exclue des possibilités pour l'Autodesign.

Recalculer le projet et faisons une liste pour les poteaux. Ceci peut être fait à travers "Bibliothèque -> Structure, analyse, liste de sections" et choisissez "Sections laminées un type".

Sélectionnez maintenant les profils qui doivent être ajoutés à la liste :



En exécutant un Autodesign dans le menu Acier maintenant pour les poteaux HEA220, cette liste peut être choisie :



Pour le moment, ce profil a un contrôle unité max de 0.368, SCIA Engineer va donc chercher le profil le plus petit dans "LIST1" qui va passer le contrôle unité

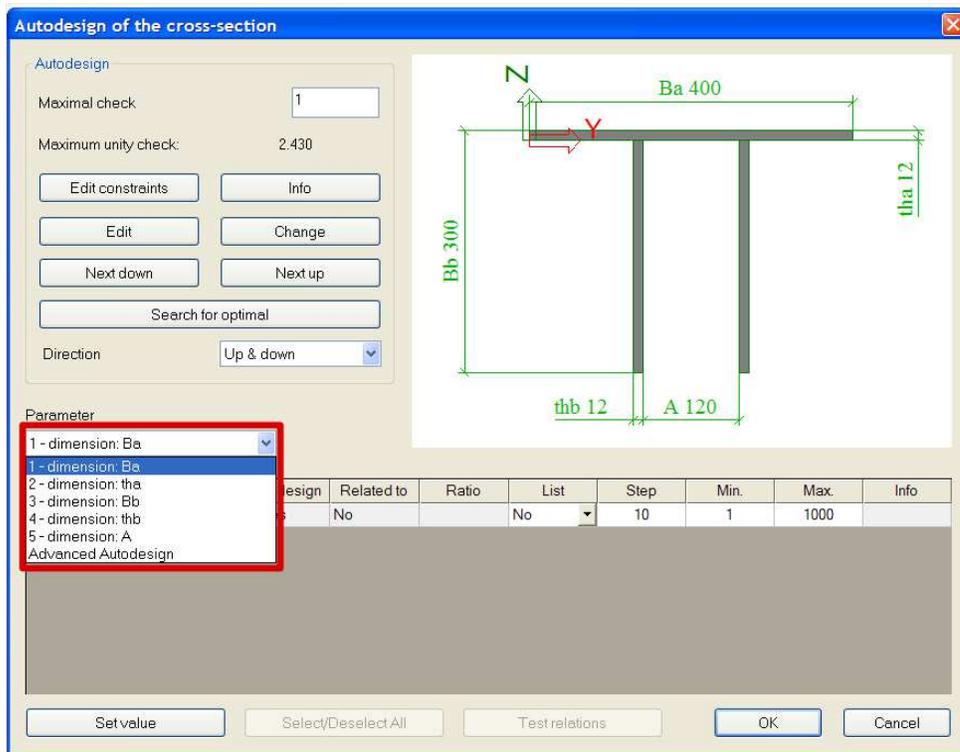
Fermez cet exemple sans enregistrer ! Il sera encore utilisé dans le paragraphe suivant !

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

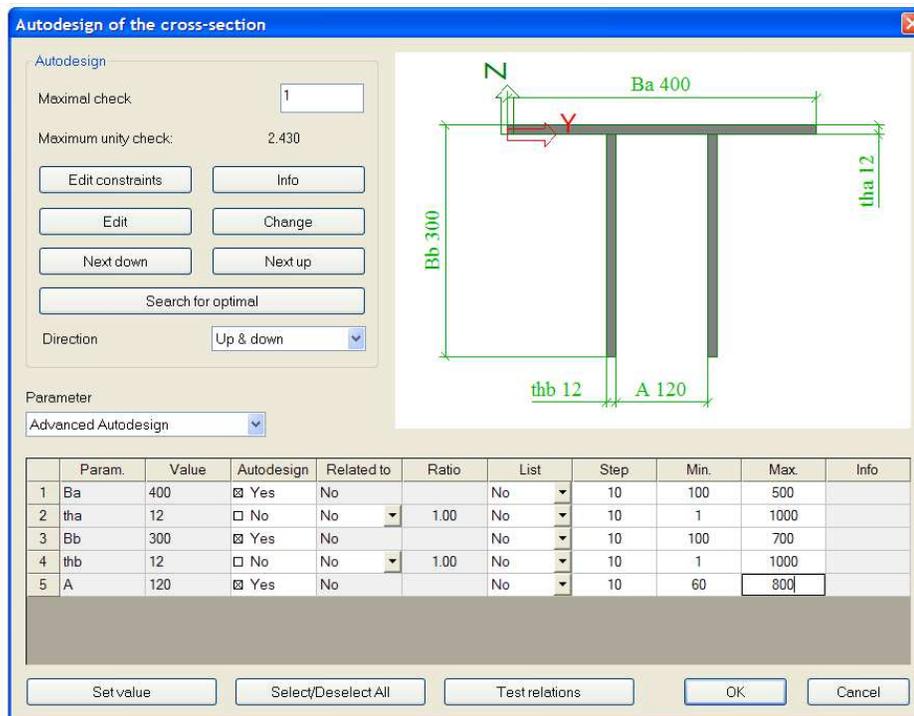
Exemple: Optimisation2.esa

Allez vers "Acier -> Barres -> Contrôle ELU -> Contrôle" et allez dans le menu Autodesign pour cette barre.

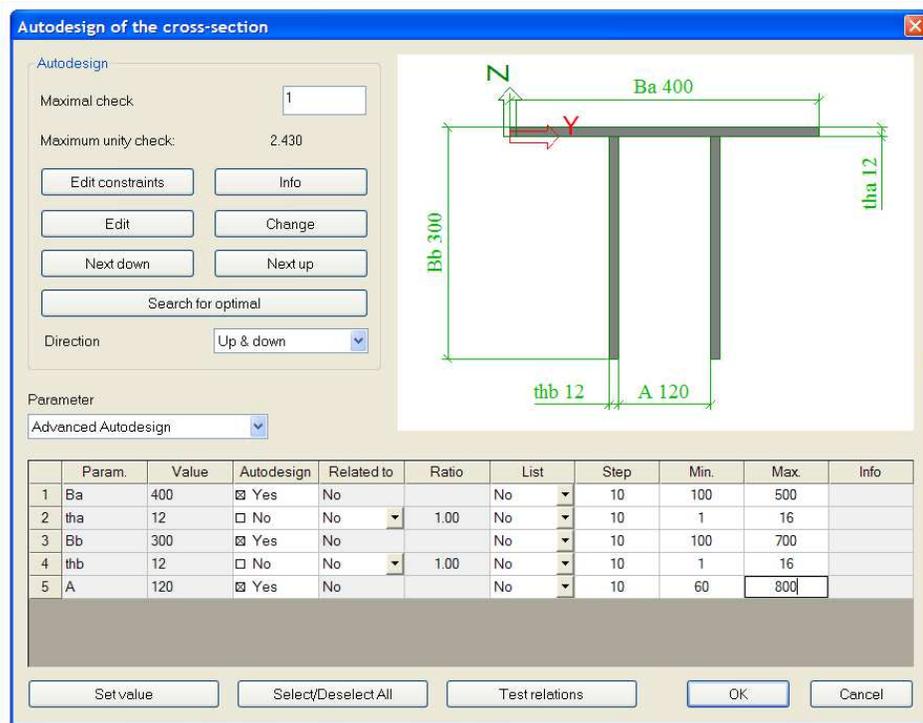
Ce profil a plusieurs paramètres, l'utilisateur peut donc choisir quels paramètres doivent être mis à jour :



L'option “**Autodesign Avancé**” va aussi apparaître. Avec cette option, différents paramètres peuvent être optimisés en même temps et une restriction pour chaque paramètre peut être donnée. Introduisez donc les options suivantes :



Les épaisseurs thb et tha ne sont donc pas optimisés. Toutes les autres options peuvent être adaptées par SCIA Engineer. Lorsque vous cliquez sur “Optimisation automatique”, le profil suivant est suggéré par SCIA Engineer :



Avec l'option "Choisir valeur" une valeur pour un certain paramètre peut être fixée. Sélectionnez donc le paramètre "Ba" et cliquez sur "Choisir valeur". Vous pouvez maintenant introduire une valeur de 500mm. Et le contrôle unité max pour cette section sera adapté automatiquement.

Optimisation générale

Il est aussi possible de faire une optimisation générale dans SCIA Engineer. Avec cette option, un ou plusieurs profils peuvent être optimisés en même temps. Ensuite, le calcul sera recommencé et les efforts internes sont recalculés avec la nouvelle section droite, suivant encore une fois par une nouvelle optimisation.

Ce processus itératif peut

- Stopper parce que tous les profilés ne doivent pas être optimisés et le même profil a été trouvé dans l'étape précédente
- Ou stopper parce que le nombre maximum d'itérations a été atteint si celui-ci est introduit par l'utilisateur.

Il est conseillé d'introduire un nombre d'itérations, sinon ce processus d'optimisation peut devenir une boucle et stoppera après 99 itérations. Cela prendra beaucoup de temps de calcul.

Le principe du processus d'optimisation générale est expliqué par l'exemple suivant.

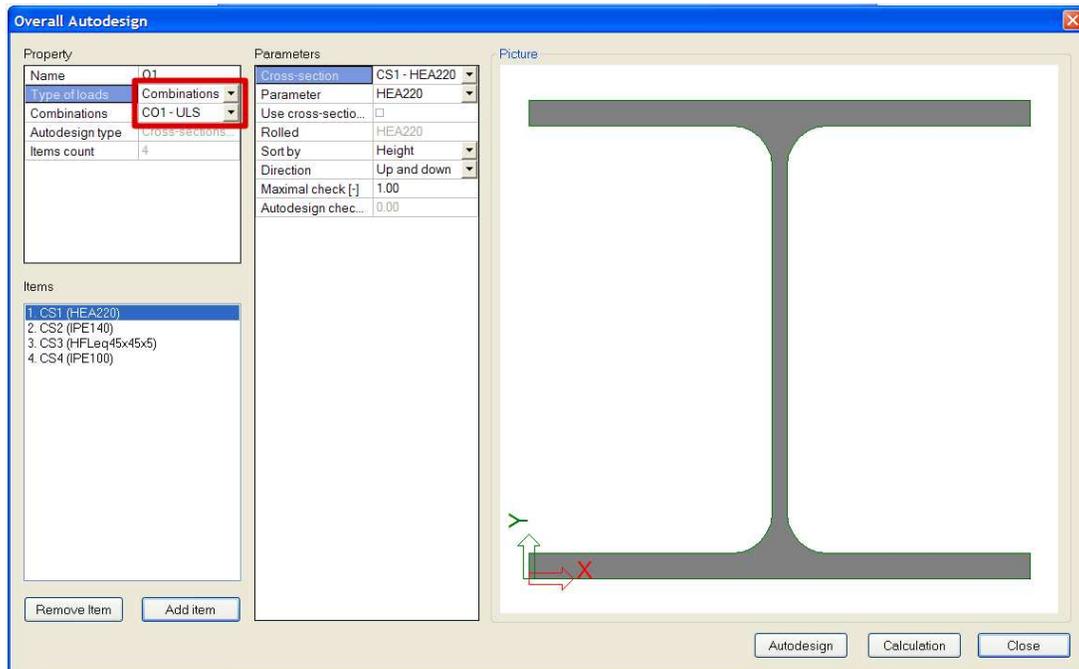
Exemple: Optimisation.esa

Si cet exemple est encore ouvert depuis le dernier chapitre, veuillez s'il vous plait le fermer et le rouvrir sans l'enregistrer.

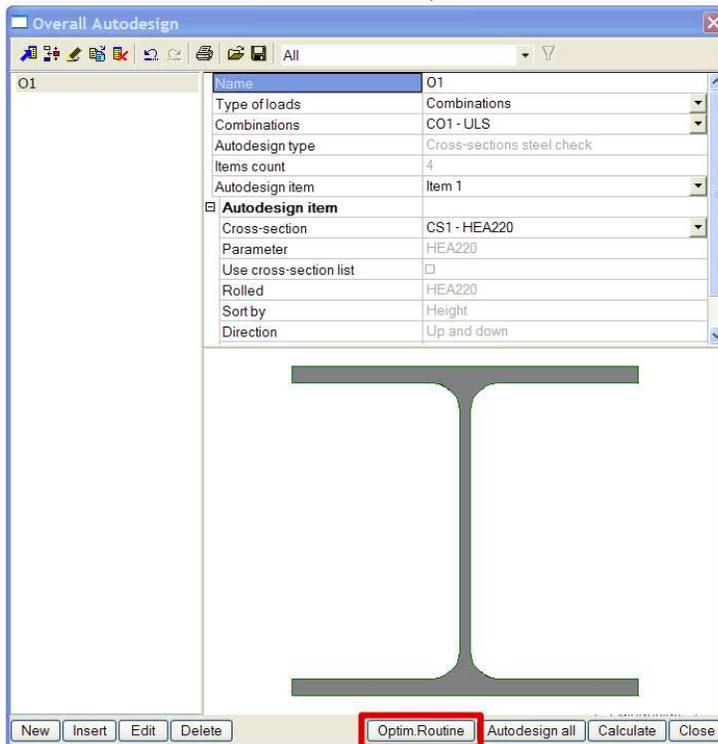
Calculez le projet et allez dans le menu "Principal -> Calcul, Maillage -> **Autodesign**". Cliquez ici sur **Ajouter un** et choisissez "Autodesign de section" et ajoutez toutes les sections droites dans ce processus d'Autodesign.

La combinaison pour laquelle le calcul d'optimisation doit être fait peut être choisie.

Aussi pour chaque profil, l'utilisateur peut indiquer si ce profil doit être optimisé seulement dans la direction "Augmenter" ou dans la direction 'Augmenter et réduire". Avec cette dernière option, il y a une chance sur le processus itératif devient une boucle.



Fermez maintenant cette fenêtre et cliquez dans la fenêtre suivante sur **Routine d'Optimisation** :



L'utilisateur peut maintenant choisir un nombre maximum d'itérations :

- Déterminer automatiquement : le processus itératif s'arrêtera si tous les profils sont optimisés et les résultats sont identiques entre les deux dernières itérations. L'utilisateur ne va donc pas introduire de nombre maximal d'itérations.
- Limiter le nombre d'itérations : nombre maximum de pas d'itération.

Introduisez 4 pas d'itération comme nombre limite et cliquez sur "Départ".

Le processus itératif va maintenant commencer. Le processus itératif va s'arrêter lorsqu'aucune différence sera trouvée ou après 4 itération. Dans cet exemple, SCIA Engineer va arrêter la recherche après 3 itérations parce que tous les profils restent les même après la troisième itération.

Après ce processus, une fenêtre d'information à propos de cette itération va s'afficher.

ITERATION 1:

1. Routine step: 1

1.1. O1

Cross-section	Parameter	Sort by	Original cross-section	Autodesign of cross-section	Autodesign check [-]
CS1 - HEA160	HEA160	Height	CS1 - HEA220	CS1 - HEA200A	0.99
CS2 - IPE200	IPE200	Height	CS2 - IPE140	CS2 - IPE200	0.94
CS3 - HFLeq90x90x9	HFLeq90x90x9	Height	CS3 - HFLeq45x45x5	CS3 - HFLeq80x80x10	0.80
CS4 - IPE140A	IPE140A	Height	CS4 - IPE100	CS4 - IPE140	0.79

Profils modifiés :

- CS1: HEA220 -> HEA200A
- CS2: IPE140 -> IPE200
- CS3: HFLeq45x45x5 -> HFLeq80x80x10
- CS4: IPE100 -> IPE140

ITERATION 2:

2. Routine step: 2

Cross-section	Parameter	Sort by	Original cross-section	Autodesign of cross-section	Autodesign check [-]
CS1 - HEA160	HEA160	Height	CS1 - HEA200A	CS1 - HEA160	0.98
CS2 - IPE200	IPE200	Height	CS2 - IPE200	CS2 - IPE200	0.91
CS3 - HFLeq90x90x9	HFLeq90x90x9	Height	CS3 - HFLeq80x80x10	CS3 - HFLeq90x90x9	0.93
CS4 - IPE140A	IPE140A	Height	CS4 - IPE140	CS4 - IPE140A	0.96

Profils modifiés :

- CS1: HEA220A -> HEA160
- CS3: HFLeq80x80x10 -> HFLeq90x90x9
- CS4: IPE140 -> IPE140A

ITERATION 3:

3. Routine step: 3

Cross-section	Parameter	Sort by	Original cross-section	Autodesign of cross-section	Autodesign check [-]
CS1 - HEA160	HEA160	Height	CS1 - HEA160	CS1 - HEA160	0.91
CS2 - IPE200	IPE200	Height	CS2 - IPE200	CS2 - IPE200	0.95
CS3 - HFLeq90x90x9	HFLeq90x90x9	Height	CS3 - HFLeq90x90x9	CS3 - HFLeq90x90x9	0.95
CS4 - IPE140A	IPE140A	Height	CS4 - IPE140A	CS4 - IPE140A	0.97

Aucun profil n'est modifié. Le processus itératif est donc arrêté.

Calcul au 2nd ordre et imperfections

Général

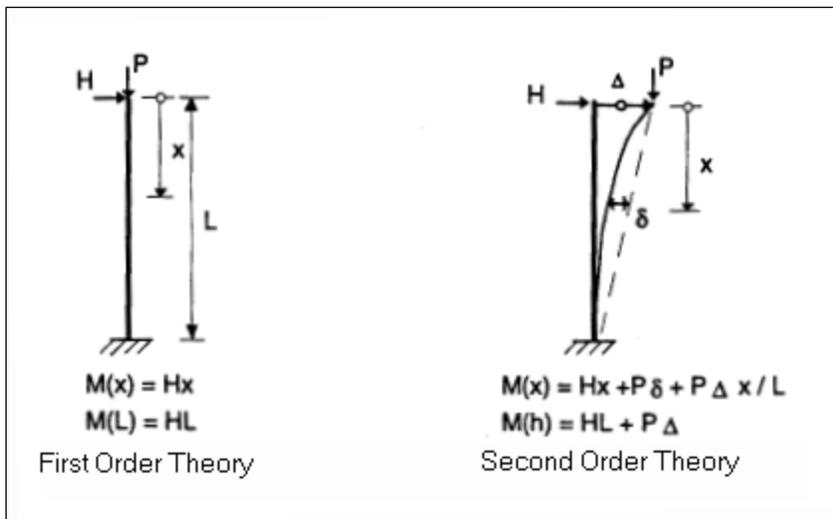
Le but de l'analyse globale est de déterminer la distribution des efforts internes et des moments et les déplacements correspondants pour une structure soumise à un chargement spécifique.

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

Une autre distinction importante est celle entre les méthodes qui prennent en compte et celles qui négligent les effets de la configuration réelle de la structure déformée. Ces méthodes sont appelées respectivement **méthode du second-ordre** et **méthode du premier-ordre**.

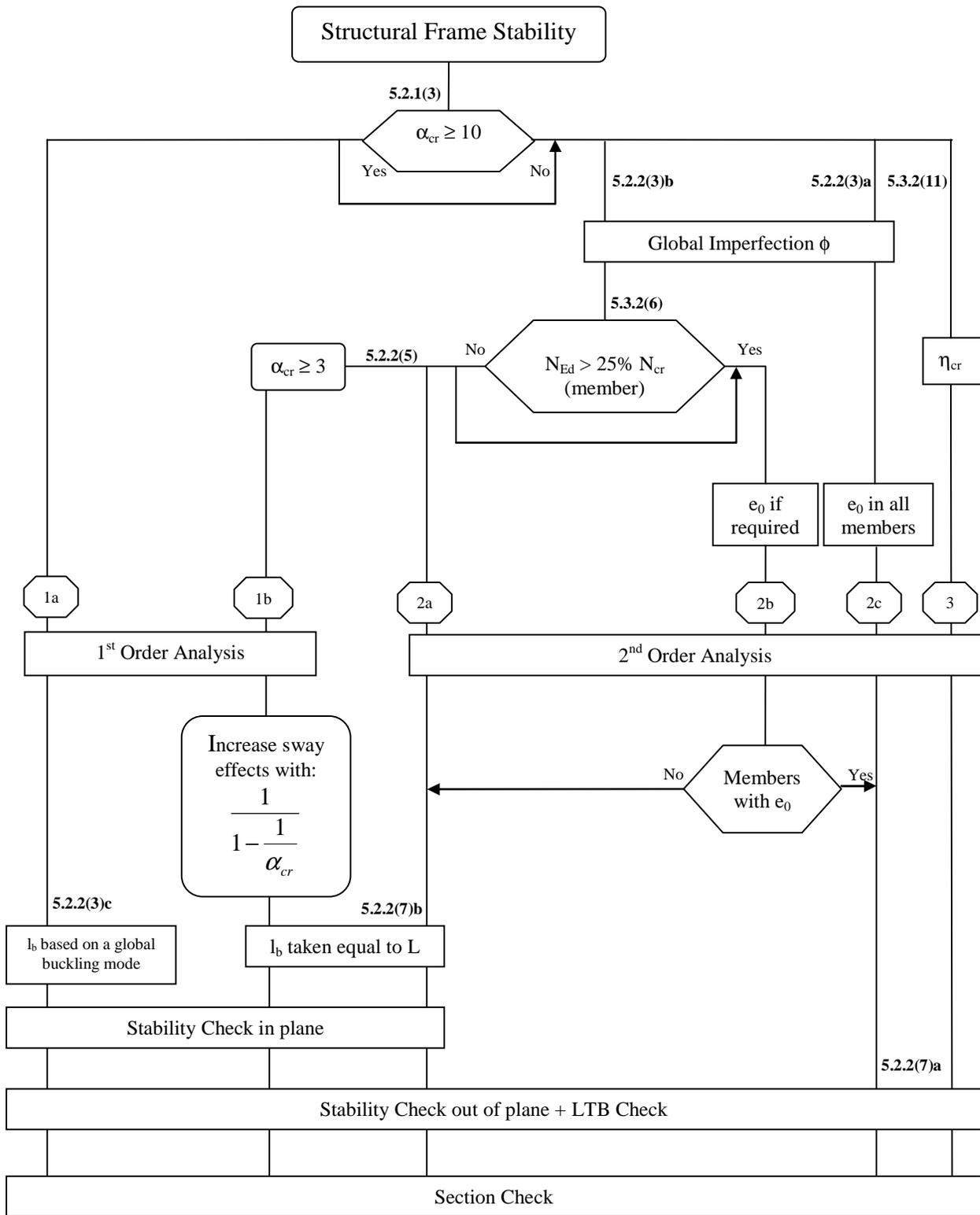
La théorie du second-ordre peut être adoptée dans tous les cas alors que la théorie du premier-ordre peut seulement être utilisée lorsque les effets de déplacement sont négligeables.

Les effets de second-ordre se composent d'effets de second ordre locaux ou sur l'élément, appelé effet P- δ et d'un effet de second-ordre global, nommé effet P- Δ .



Dans la page suivante, une présentation générale de l'analyse globale selon l'EN 1993-1-1, chapitre 5, sera donnée :

- Toutes les règles dans cette vue d'ensemble sont données dans l'EN 1993-1-1 art. 5. Pour chaque étape, la règle sera indiquée. La première règle ($\alpha_{cr} \geq 10$) sera expliquée dans l'EN 1993-1-1 **art. 5.2.1(3)**.
- Dans cette vue d'ensemble 3 chemins sont définis :
 - Chemin 1 : un calcul au premier ordre sera exécuté
 - Chemin 2 : un calcul au second ordre sera exécuté avec imperfections globales (et locales).
 - Chemin 3 : un calcul au second ordre sera exécuté avec la forme de flambement de la structure comme imperfection.
- Le calcul va devenir plus précis lorsque vous choisirez un chemin plus à droite.
- Le chemin à gauche va permettre un calcul plus rapide parce qu'un calcul au premier ordre peut être exécuté sans itérations mais cette théorie du premier-ordre peut être utilisée seulement lorsque les effets de déplacement sur le comportement de la structure sont négligeables.
- Dans le paragraphe suivant, les règles dans la vue d'ensemble seront expliquées.



Avec : η_{cr} Mode de flambement critique élastique.
 L Longueur système de l'élément
 l_b Longueur de flambement

Alpha critique – Pas dans l'édition concept

Le calcul de l'alpha critique est fait par un calcul de stabilité dans SCIA Engineer. Pour ce calcul, il est nécessaire d'avoir l'édition Professional ou l'édition Expert. Le calcul de stabilité a été introduit dans le module esas.13.

Selon l'EN 1993-1-1, l'analyse au 1^{er} Ordre peut être utilisée pour une structure si l'augmentation des efforts internes ou des moments ou n'importe quelle autre modification du comportement de la structure causé par la déformation peut être négligé. Il peut être considéré que cette condition est remplie si le critère suivant est respecté :

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \text{ pour l'analyse élastique}$$

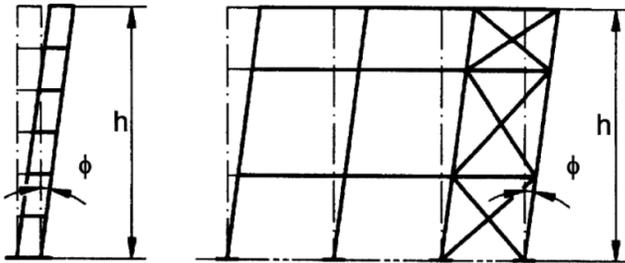
Avec : α_{cr} : le coefficient avec lequel la charge de dimensionnement doit être augmentée pour causer l'instabilité élastique dans un mode global.
 F_{Ed} : la charge de dimensionnement appliquée à la structure.
 F_{cr} : la charge de flambement critique élastique pour l'instabilité globale, basée sur la rigidité élastique initiale.

Si α_{cr} a une valeur plus petite que 10, un calcul de 2nd Ordre doit être exécuté. Selon le type d'analyse, les imperfections Globales et Locales doivent être considérées toutes les deux.

EN1993-1-1 spécifie que les effets de 2nd Ordre et les imperfections peuvent être pris en compte par une analyse globale ou partiellement par l'analyse globale et partiellement à l'aide de contrôles de stabilité individuel sur les éléments.

Imperfection global de portique ϕ

L'imperfection globale de portique sera introduite pour toute la structure par une valeur d'imperfection ϕ . Cette valeur peut être calculée avec la formule suivante (EN 1993-1-1 art. 5.3.2(3)a):



$$\phi = \frac{1}{200} \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{Mais} \quad \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$$

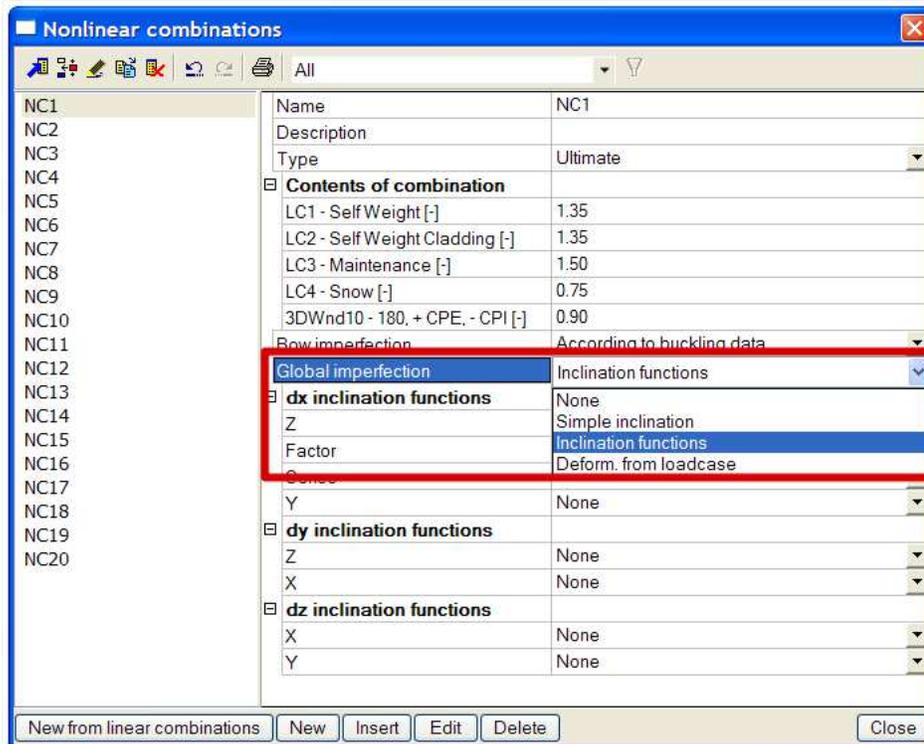
Avec : h La hauteur de la structure en mètres
 m Le nombre de poteaux dans une rangée, y compris les poteaux qui ne supportent qu'une charge verticale N_{Ed} qui n'est pas en dessous de 50% de la valeur moyenne de la charge verticale par poteau dans le plan considéré.

L'imperfection globale peut être introduite dans SCIA Engineer dans les combinaisons linéaires comme expliqué par l'exemple ci-dessous.

Exemple: Industrial Hall.esa

Dans cet exemple, deux fonctions d'imperfections globales seront utilisées : une suivant la direction globale X et une suivant la direction globale Y. Il n'est pas nécessaire de combiner les deux imperfections dans la même combinaison.

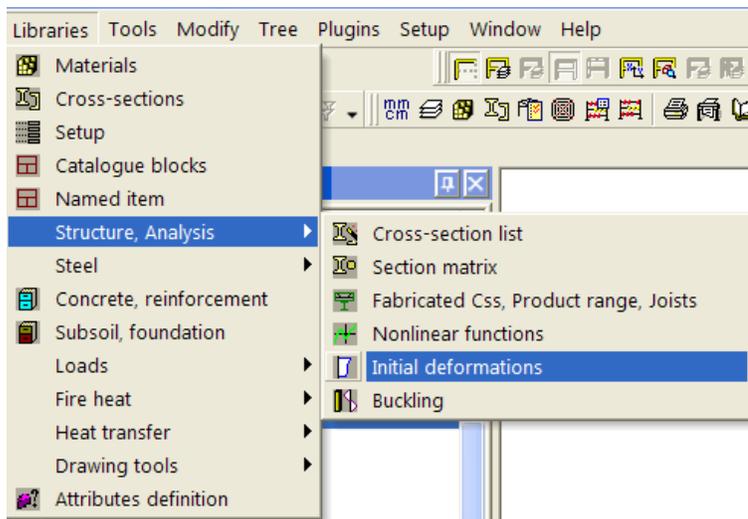
Dans SCIA Engineer, l'utilisateur peut choisir entre quatre options pour l'**imperfection globale** dans les combinaisons non linéaires :



- **Aucune** : Aucune imperfection globale ne sera prise en compte
- **Inclinaison simple** : l'utilisateur va introduire une déformation dans la direction globale X-ou/et Y- comment étant l'imperfection en mm par mètre de hauteur dans la direction globale Z-[mm/m].
- **Fonctions d'inclinaison** : possibilité d'introduire une fonction d'inclinaison définie par l'utilisateur ou une fonction d'inclinaison de l'EN 1993-1-1 (cette option est expliquée ci-dessous).
- **Déformation à partir d'un cas de charge** : avec cette option, l'utilisateur peut choisir un cas de charge calculé et la déformation de ce cas de charge sera utilisée comme imperfection globale initiale.

Dans cet exemple, l'option "fonctions d'inclinaison" a été choisie.

Ces fonctions d'inclinaison sont introduites à travers le menu "Principal -> Bibliothèques -> Structure, Analyse -> Déformations initiales" :



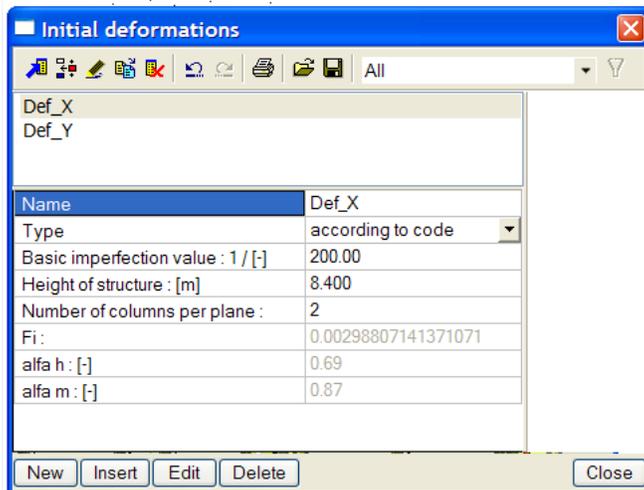
Le type est choisi comme "EN 1993-1-1 Art. 5.3.2(3)", avec une imperfection standard de 1/200.

La hauteur de la construction est 8.4m pour les deux fonctions d'inclination.

Il y a 6 poteaux dans la direction X, mais au milieu seuls 2 poteaux sont modélisés. Parce que une grande partie de la structure est supportée par seulement 2 poteaux dans la direction-X, dans cet exemple le nombre de poteaux dans cette direction a été pris égal à "2".

Il y a 11 poteaux dans la direction-Y. Mais les poteaux à l'extrémité sont plus petits que ceux du milieu. Nous prenons donc dans cet exemple "9" poteaux dans la direction-Y.

La fonction d'inclination pour la direction-x (Def_X) dans SCIA Engineer est affichée ci-dessous :

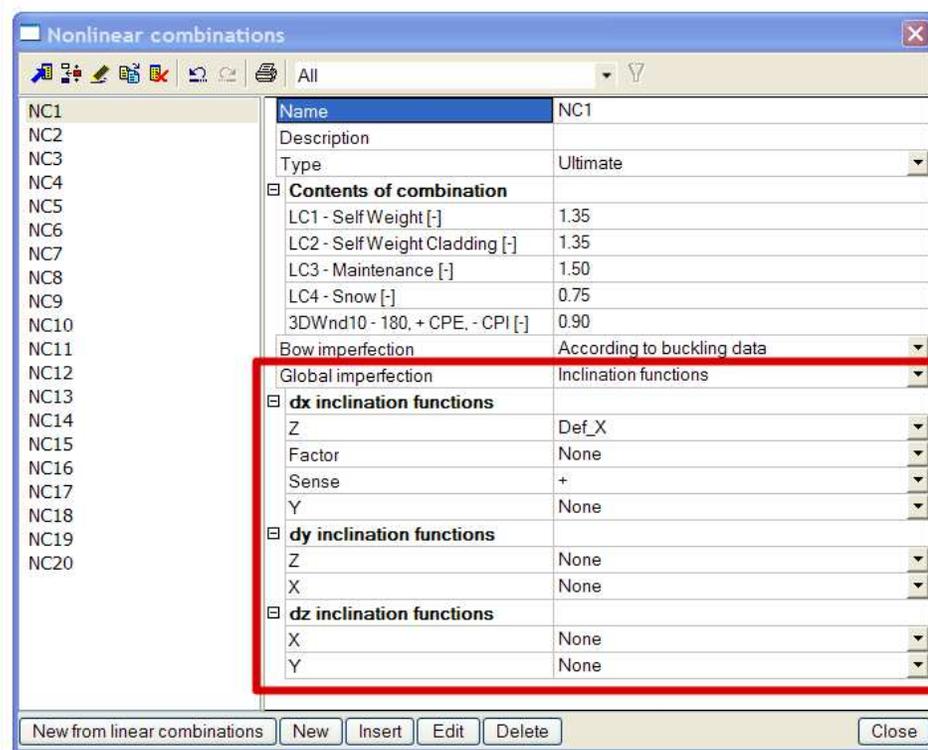


Dans cet exemple, 5 combinaisons non linéaires sont introduites :

- $1,35 \times \text{Self Weight} + 1,35 \times \text{Self Weight Cladding} + 1,5 \times \text{Maintenance} + 0,75 \times \text{Snow} + 0,9 \times \text{3DWind10}$
- $1,35 \times \text{Self Weight} + 1,35 \times \text{Self Weight Cladding} + 0,75 \times \text{Snow} + 1,5 \times \text{3DWind13}$
- $1,35 \times \text{Self Weight} + 1,35 \times \text{Self Weight Cladding} + 0,75 \times \text{Snow} + 1,5 \times \text{3DWind14}$
- $1,35 \times \text{Self Weight} + 1,35 \times \text{Self Weight Cladding} + 0,75 \times \text{Snow} + 1,5 \times \text{3DWind15}$
- $1,35 \times \text{Self Weight} + 1,35 \times \text{Self Weight Cladding} + 0,75 \times \text{Snow} + 1,5 \times \text{3DWind16}$

Toutes les combinaisons sont introduites 4 fois :

- NC1-NC5: inclinaison dans la direction positive X
- NC6-NC10: inclinaison dans la direction négative X
- NC11-NC15: inclinaison dans la direction positive Y
- NC16-NC20: inclinaison dans la direction négative Y



Imperfection locale

$N_{Ed} > 25\% N_{cr}$

L'imperfection locale relative des éléments pour le flambement flexionnel est donnée par la valeur : e_0/L .

Cette imperfection locale ne doit pas être appliquée sur chaque élément comme spécifié dans l'EN 1993-1-1 art. 5.3.2(6):

L'imperfection locale doit être appliquée lorsque l'effort normal N_{Ed} dans un élément est supérieur à 25% de la charge critique N_{cr} de l'élément :

Lorsqu'une analyse globale est exécutée pour déterminer les efforts et les moments d'extrémité à utiliser dans les contrôles des éléments selon 6.3, les imperfections locales peuvent être négligées. Cependant, pour les portiques qui sont sensibles aux effets locaux de second ordre, en plus des imperfections globales, une imperfection locale doit être considérée pour chaque élément comprimé pour lequel les conditions suivantes sont remplies :

- Au moins une connexion résistant au moment sur une extrémité de l'élément

- $\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}$

$$\text{Et } \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

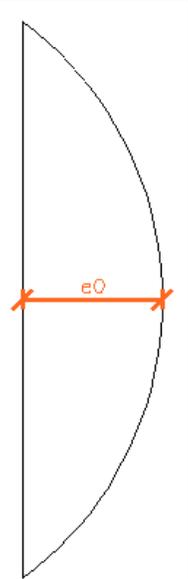
$$\text{Donc : } \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} > 0,5 \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}$$

$$\frac{1}{N_{cr}} > 0,25 \frac{1}{N_{Ed}}$$

$$N_{Ed} > 0,25 N_{cr}$$

Imperfection locale e_0

L'imperfection locale initiale est donnée par :



Buckling curve acc. to Table 6.1	elastic analysis	plastic analysis
	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

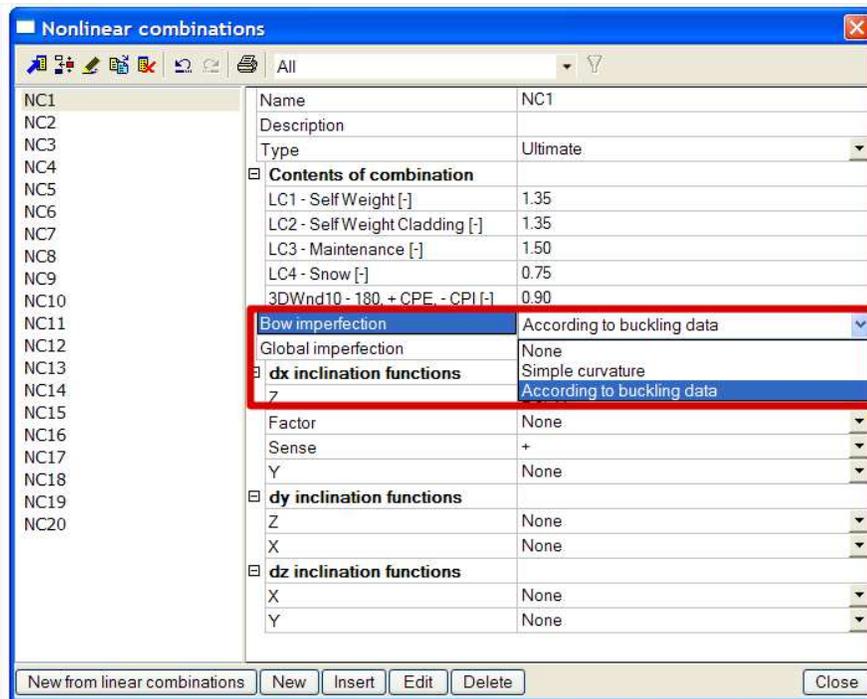
Où L est la longueur de l'élément.

Comme expliqué dans le chapitre précédent, l'imperfection locale doit être appliquée lorsque l'effort normal N_{Ed} dans un élément est supérieur à 25% de la charge de flambement critique de l'élément N_{cr} . Si $N_{Ed} < 25\% N_{cr}$, l'utilisateur peut choisir d'appliquer cette imperfection locale ou pas.

La courbe de flambement qui est utilisée pour le calcul de l'imperfection est la courbe introduite dans bibliothèques des sections. Pour les sections standards, la courbe selon la norme est automatiquement utilisée, pour les autres sections (sections de type général) l'utilisateur doit introduire la courbe de flambement manuellement.

Exemple: Industrial hall.esa

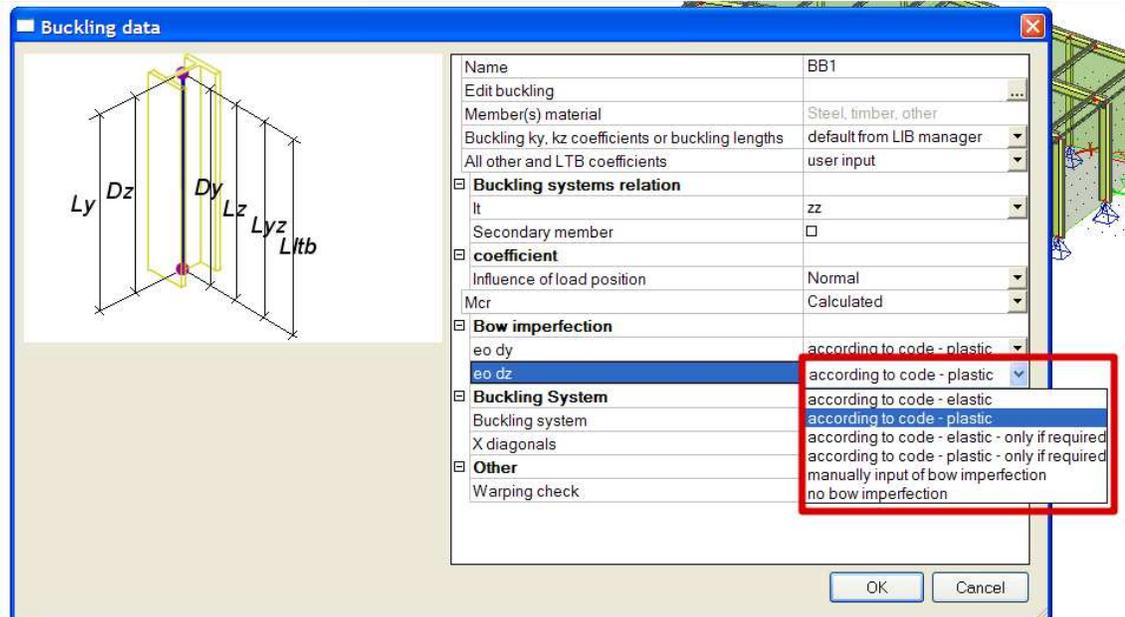
Dans SCIA Engineer, l'utilisateur peut choisir entre trois options pour l'**imperfection locale** dans les combinaisons non linéaires :



- **Aucune** : Aucune imperfection ne sera prise en compte
- **Courbure simple** : l'utilisateur va introduire une déformation "f" ou "1/f" pour tous les éléments, où "1/f" correspond à la valeur "e0/L" comme expliqué précédemment.
- **Selon les données de flambement** : avec cette option, l'utilisateur peut choisir une imperfection locale comme définie dans les données de flambement, la courbe de flambement sera donc prise en compte pour chaque élément (cette option est expliquée ci-dessous).

Dans cet exemple, l'option "Selon les données de flambement" a été choisie.

Les données de flambement peuvent être introduites via "Acier -> Barres -> Données de contrôle d'élément -> Données de flambement"



L'utilisateur peut choisir entre 6 options:

- **Selon la norme – élastique** : la valeur élastique selon la courbe de flambement de la section droite sera utilisée.
- **Selon la norme – plastique**: la valeur plastique selon la courbe de flambement de la section droite sera utilisée.
- **Selon la norme – élastique – seulement si requis** : la valeur élastique selon la courbe de flambement de la section droite sera utilisée si $N_{ed} > 25\% N_{cr}$.
- **Selon la norme – plastique – seulement si requis** : la valeur plastique selon la courbe de flambement de la section droite sera utilisée si $N_{ed} > 25\% N_{cr}$
- **Courbure initiale utilisateur** : l'utilisateur peut introduire manuellement une valeur pour cette imperfection.
- **Pas de courbure initiale** : aucune imperfection n'est prise en compte pour l'élément.

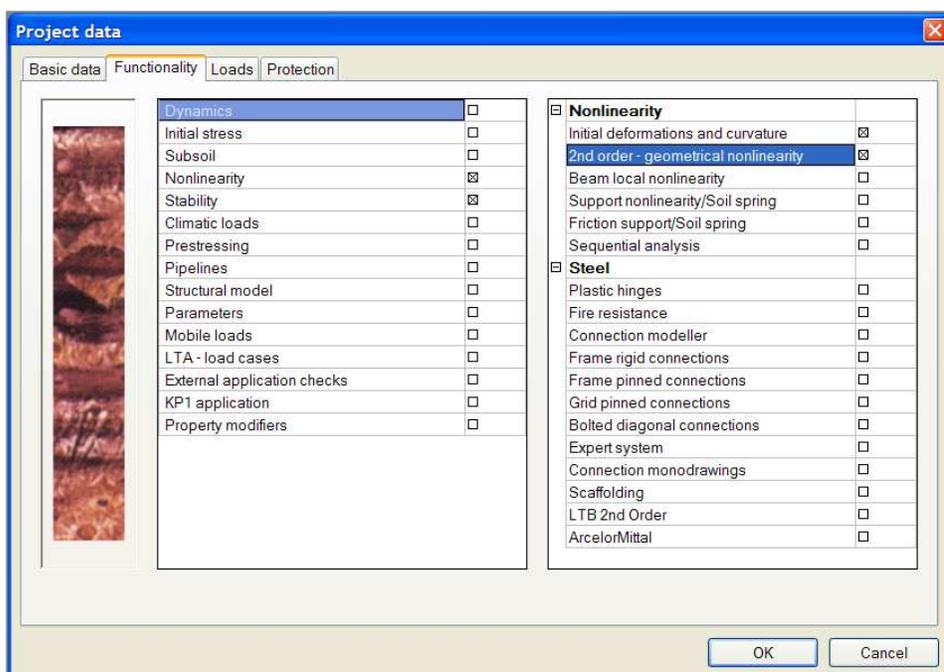
Dans cet exemple, sur toutes les barres la courbure initiale "Selon la norme – élastique" a été introduite. Excepté pour les diagonales, aucune courbure initiale n'a été introduite dans cet exemple.

Forme de flambement comme imperfection - η_{cr} – Pas dans l'édition concept

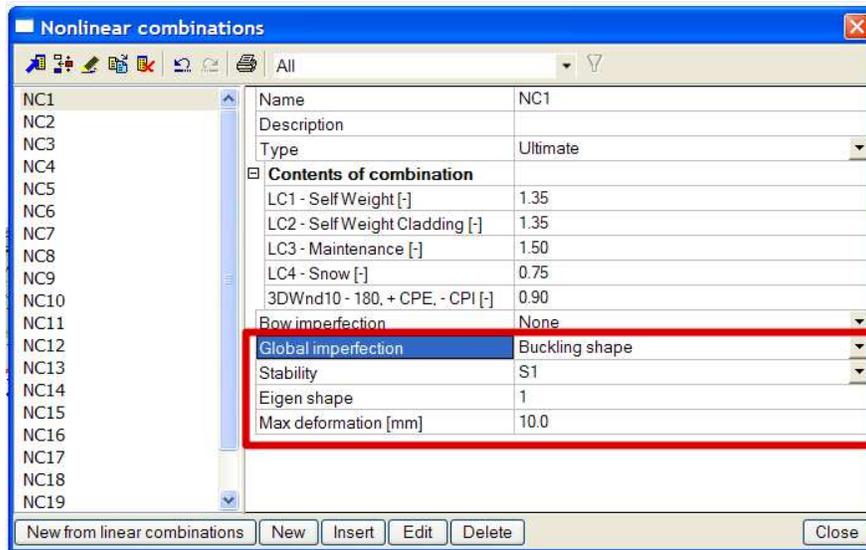
Le calcul de l'alpha critique est fait par un calcul de stabilité dans SCIA Engineer. Pour ce calcul, une édition Professional ou Expert est nécessaire. Le calcul de stabilité a été introduit dans le module esas.13.

Comme alternative, l'imperfection locale et globale peut être remplacée par la forme de flambement comme étant une imperfection (chemin 3 sur le diagramme global).

Pour introduire des imperfections géométriques, la fonctionnalité **Non linéarité > Déformations et courbures initiales** et **Stabilité** doit être activée.



Tout d'abord, le calcul de stabilité (linéaire ou non linéaire) est exécuté. Ensuite, dans les combinaisons non linéaires, l'utilisateur peut choisir la forme de flambement qui va être prise en compte. Commencez d'abord par choisir la combinaison de stabilité et juste en dessous le mode calculé. Si par exemple le premier et le deuxième mode donnent une valeur négative pour l'alpha critique, il est possible que l'utilisateur veuille considérer le 3^{ème} mode qui a été calculé :



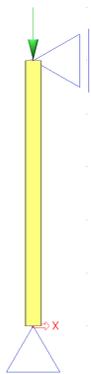
La dernière option qui doit être introduite est une valeur pour la déformation maximum. Il s'agit de la déformation du nœud qui a la plus grande déformation de la structure. SCIA Engineer va recalculer tous les déplacements des autres nœuds en utilisant la déformation maximale.

Puisque la forme de flambement est sans dimension, EN 1993-1-1 donne une formule pour calculer l'amplitude η_{init} de l'imperfection. Ci-dessous, un exemple de ce calcul est donné 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 droite de type **IPE 300**. Il est fabriqué à partir de **S235** et a les propriétés suivantes :



$$E = 210.000 \text{ N/mm}^2$$

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{M1} = 1.00$$

$$L = 5000 \text{ mm}$$

$$A = 5380 \text{ mm}^2$$

$$I_y = 83560000 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y} = 628400 \text{ mm}^3$$

Calcul de la forme de flambement

Tout d'abord, un **calcul de stabilité** est effectué en utilisant une charge de 1kN. De cette manière, la charge critique élastique de flambement N_{cr} est obtenue.

Afin d'obtenir des résultats précis, le **Nombre d'éléments 1D** est pris égal à **10**. Cela peut être fait dans "Configuration -> Maillage". De plus, la **déformation de cisaillement** est négligée pour que le résultat puisse être comparé à un calcul manuel.

Le calcul de stabilité donne le résultat suivant :

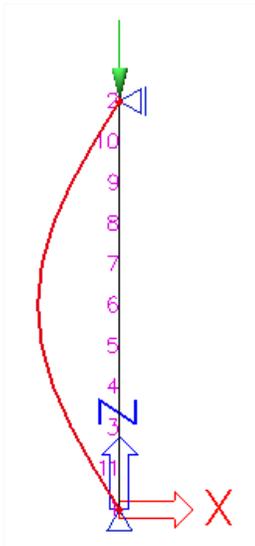
Critical load coefficients

Critical load coefficients	
N	f
-	Π
Stability combination : S1	
1	6885.28
2	27050.71
3	59138.56
4	101213.65

Cela peut être vérifié avec la formule d'Euler en utilisant la longueur de l'élément comme longueur de flambement :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 8,3560 \cdot 10^7 \text{ mm}^4}{(5000 \text{ mm})^2} = 6927,51 \text{ kN}$$

L'image ci-dessous montre les nœuds de maillage du poteau et la forme de flambement correspondante :



Displacement of nodes

Stability calculation, Extreme : No

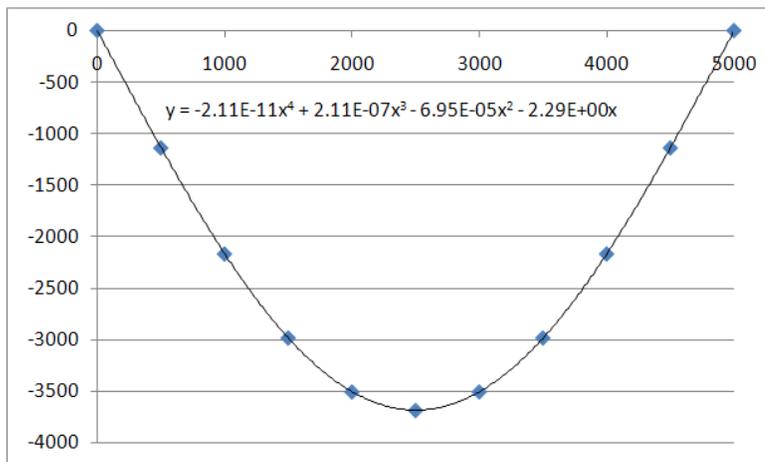
Selection : All

Stability combinations : S1/1 - 6885.28

Values are multiplied by 10000 for better numeric representation.

Node of mesh	Case	Ux [-]	Uz [-]	Fiy [-]
1	S1/1 - 6885.28	0.00	0.00	-2314.62
11	S1/1 - 6885.28	-1138.38	0.00	-2201.33
3	S1/1 - 6885.28	-2165.34	0.00	-1872.57
4	S1/1 - 6885.28	-2980.33	0.00	-1360.50
5	S1/1 - 6885.28	-3503.59	0.00	-715.26
6	S1/1 - 6885.28	-3683.89	0.00	0.00
7	S1/1 - 6885.28	-3503.59	0.00	715.26
8	S1/1 - 6885.28	-2980.33	0.00	1360.50
9	S1/1 - 6885.28	-2165.34	0.00	1872.57
10	S1/1 - 6885.28	-1138.38	0.00	2201.33
2	S1/1 - 6885.28	0.00	0.00	2314.62

En utilisant par exemple une feuille Excel, la forme de flambement peut être approximée par un polynôme de 4^{ème} degré.



L'avantage avec un polynôme est que la dérivée seconde peut facilement être calculée.

$$\Rightarrow \eta_{cr} = -2,11 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 + 2,11 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 6,95 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 2,29 \cdot x$$

$$\Rightarrow \eta_{cr,max}'' = -2,53 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 + 1,27 \cdot 10^{-6} \cdot x - 1,39 \cdot 10^{-4}$$

Calcul de e_0

$$N_{Rk} = f_y \cdot A = 235 \frac{N}{mm^2} \cdot 5380 mm^2 = 1264300 N$$

$$M_{Rk} = f_y \cdot W_{pl} = 235 \frac{N}{mm^2} \cdot 628400 mm^3 = 147674000 Nmm \text{ (class2)}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{N_{Rk}/N_{cr}} = \sqrt{1264300N/6885280N} = 0,43$$

$\alpha = 0,21$ pour la courbe de flambement a

$$\chi = \frac{1}{0,5[1+\alpha(\bar{\lambda}-0,2)+(\bar{\lambda})^2]^2 + \sqrt{(0,5[1+\alpha(\bar{\lambda}-0,2)+(\bar{\lambda})^2])^2 - (\bar{\lambda})^2}} = 0,945$$

Ces résultats intermédiaires peuvent être vérifiés dans SCIA ENGINEER lorsqu'un Contrôle Acier est exécuté pour un poteau :

Buckling parameters	yy	zz	
Sway type	sway	non-sway	
System Length L	5.000	5.000	m
Buckling factor k	1.00	1.00	
Buckling length Lcr	5.000	5.000	m
Critical Euler load Ncr	6927.51	500.58	kN
Slenderness	40.12	149.25	
Relative slenderness Lambda	0.43	1.59	
Limit slenderness Lambda,0	0.20	0.20	

$$\Rightarrow e_0 = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \cdot \frac{1 - \chi(\bar{\lambda})^2}{1 - \chi(\bar{\lambda})} = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}}$$

$$\Rightarrow e_0 = 0,21 \cdot (0,43 - 0,2) \cdot \frac{147674000 Nmm}{1264300 N} = 5,57 mm$$

Les paramètres requis ont été calculés, dans l'étape finale l'amplitude de l'imperfection peut donc être déterminée.

Calcul de η_{init}

La section au milieu du poteau est décisive $\Rightarrow x = 2500$

$$\eta_{cr} \text{ au milieu} = -3504$$

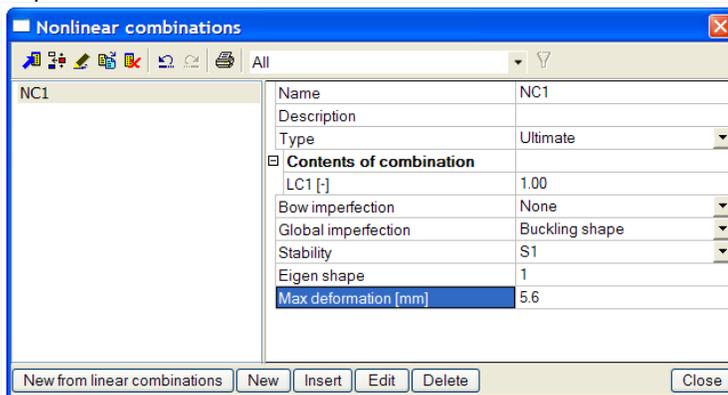
$$\eta_{cr,max}'' \text{ au milieu} = 1,44E^{-03} \frac{1}{mm^2}$$

$$\Rightarrow \eta_{init} = e_0 \cdot \frac{N_{cr}}{E \cdot I_y \cdot \eta_{cr,max}''} \cdot \eta_{cr}$$

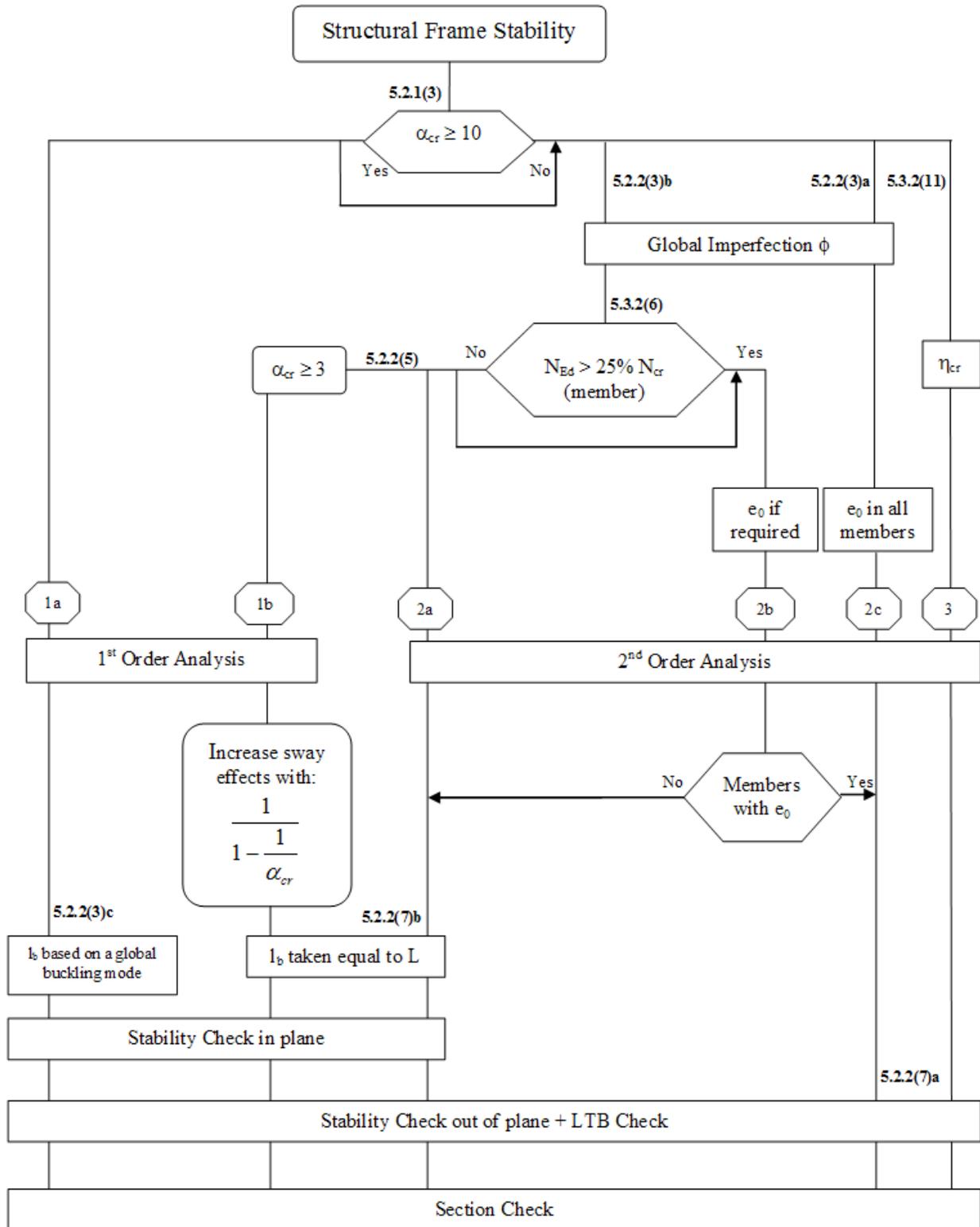
$$\Rightarrow \eta_{init} = 5,57 \text{ mm} \cdot \frac{6885280 \text{ N}}{\frac{210000 \text{ N}}{mm^2} \cdot 83560000 \text{ mm}^4 \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ 1/mm}^2} \cdot 3504$$

$$\Rightarrow \eta_{init} = \mathbf{5,34 \text{ mm}}$$

Cette valeur peut maintenant être introduite comme amplitude de la forme de flambement pour l'imperfection.

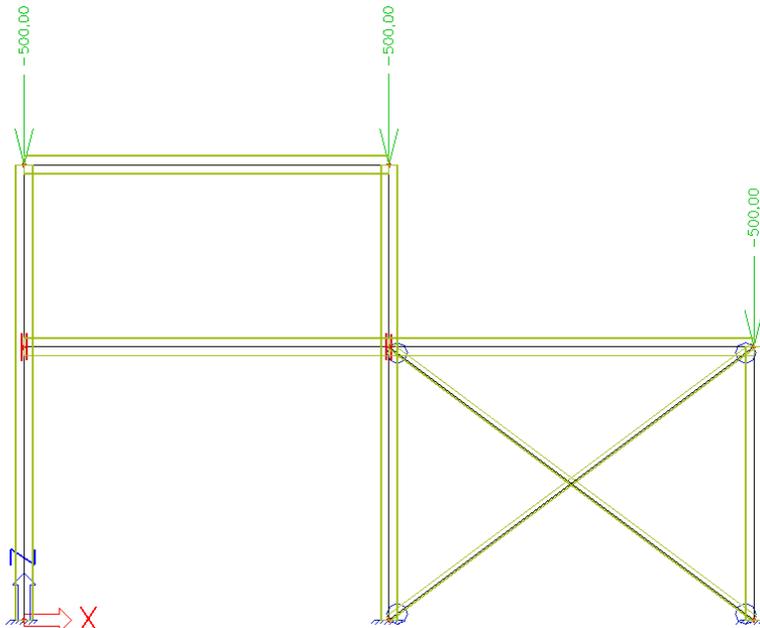


Analyse de 1^{er} ou 2^{ème} ordre – Chemins selon l'EN1993:



Exemples:**Exemple Overview Paths.esa****Exemple Overview Paths_path 1a.esa****Exemple Overview Paths_path 2a.esa****Exemple Overview Paths_path 2b.esa****Exemple Overview Paths_path 2c.esa****Exemple Overview Paths_path 3.esa****Exemple Overview**

1 cas de charge, contenant 3 charges ponctuelles de 500 kN.

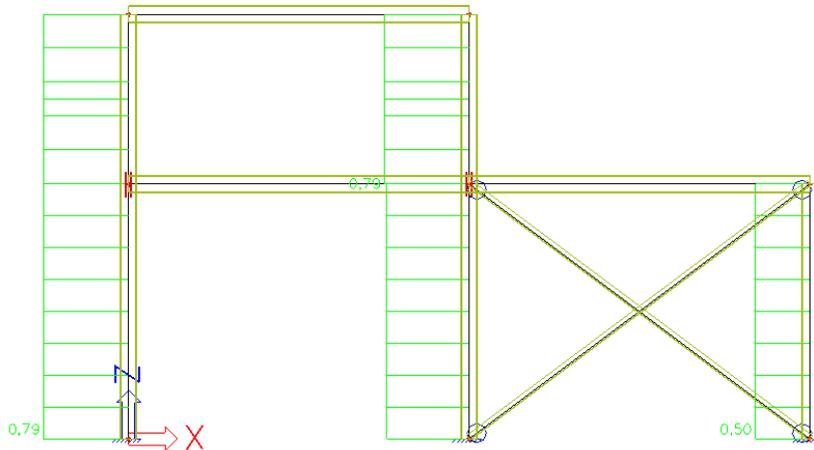
**Chemin 1a Analyse au 1^{er} ordre****Calcul linéaire****Configuration des propriétés de flambement**

- coefficient de flambement k : calculé par défaut par SCIA Engineer (valide seulement pour les structures simple !)
- propriété contreventé/non-contreventé : la configuration par défaut dans SCIA Engineer doit être contrôlée par l'utilisateur
- longueur de l'élément : proposition de SCIA Engineer, à contrôler par l'utilisateur

Alternative : introduction du coefficient de flambement k ou de la longueur de flambement l par l'utilisateur

Contrôle unité pour l'ELU

→ Le contrôle de flambement flexionnel est décisif



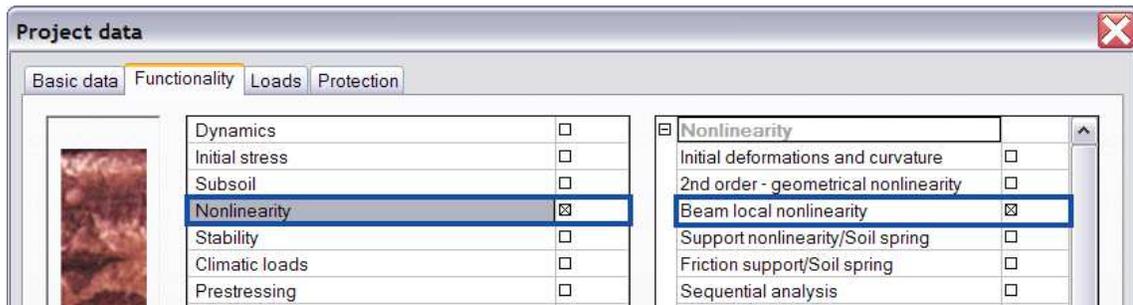
Calcul non linéaire

Même configuration des propriétés de flambement que pour le calcul linéaire.

La seule différence est la propriété 'tension seule' qui a été ajoutée aux croix de contreventement. Cela veut dire que nous considérons encore un calcul au 1^{er} ordre mais un calcul non linéaire doit être exécuté pour prendre en compte la non linéarité locale 'tension seule'.

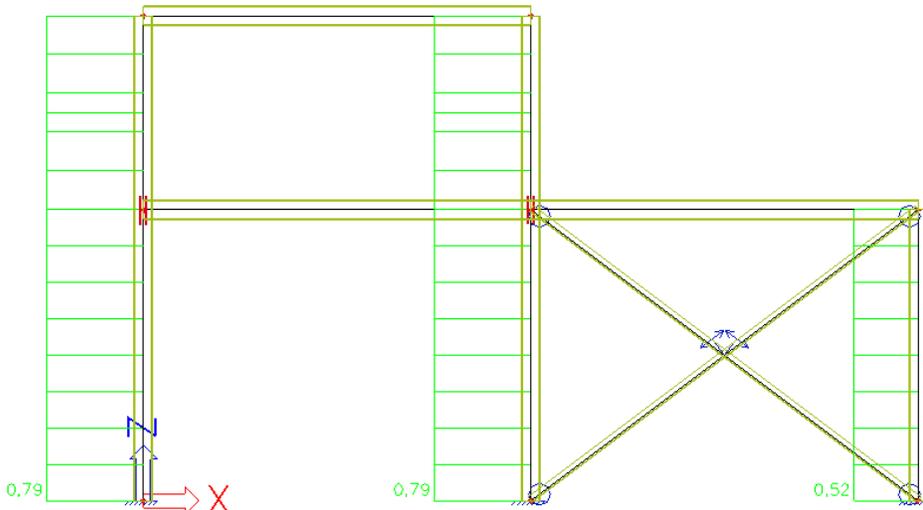
Attention : Il est nécessaire d'exécuter un calcul BATCH (linéaire & non linéaire), parce que les propriétés de flambement sont calculées seulement au cours du calcul linéaire !

Fonctionnalités



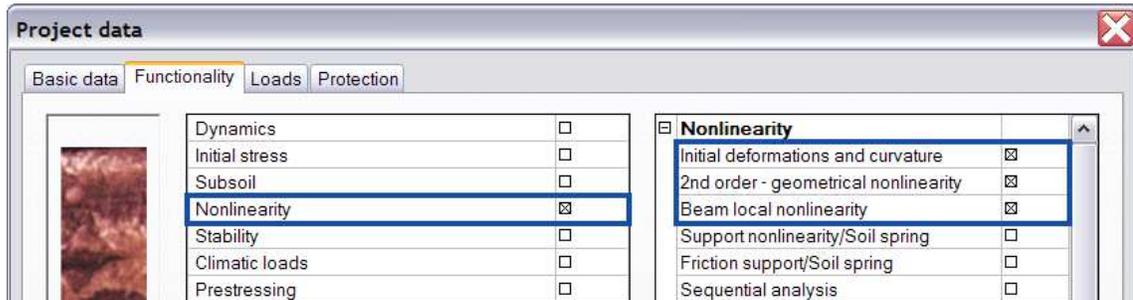
Contrôle unité à l'ELU

→ Le contrôle de flambement flexionnel est décisif



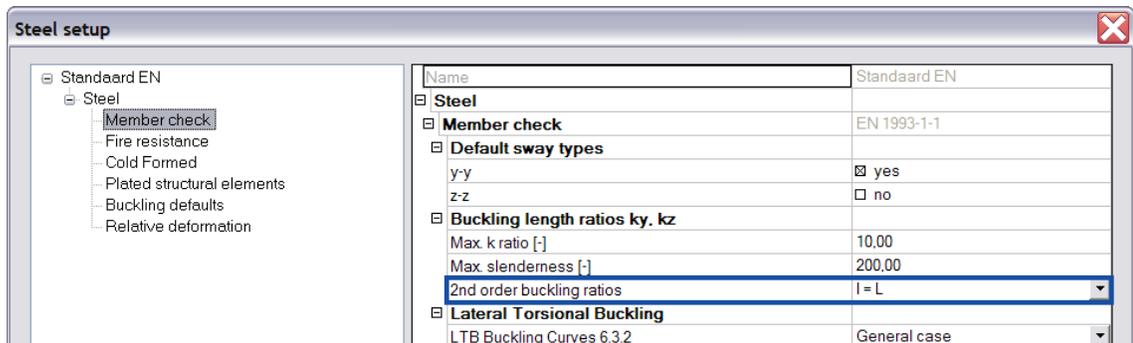
Chemin 2a Analyse au 2nd ordre – Imperfection globale (inclinaison initiale)

Fonctionnalités



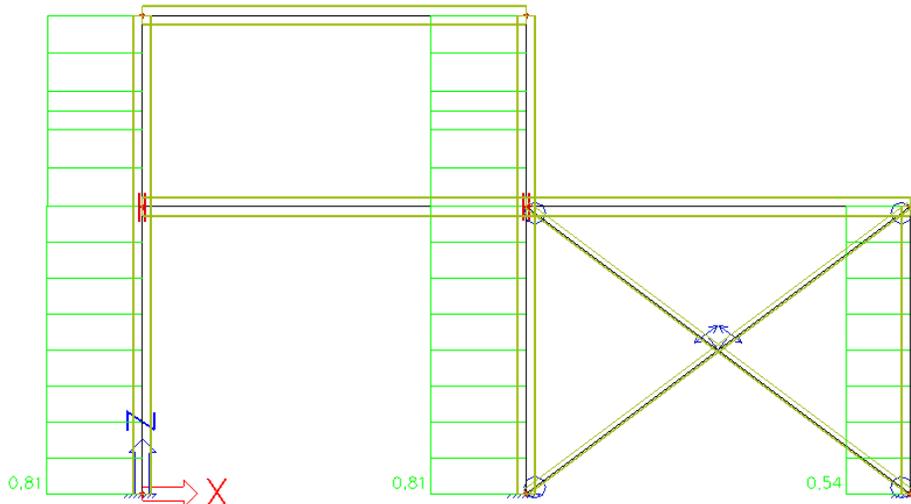
Configuration Acier

Toute la structure peut être considérée comme contreventée, ce qui veut dire que $I \leq L$ (ou de manière conservatrice $I = L$). SCIA Engineer va exécuter le contrôle de flambement flexionnel avec $k = 1$.



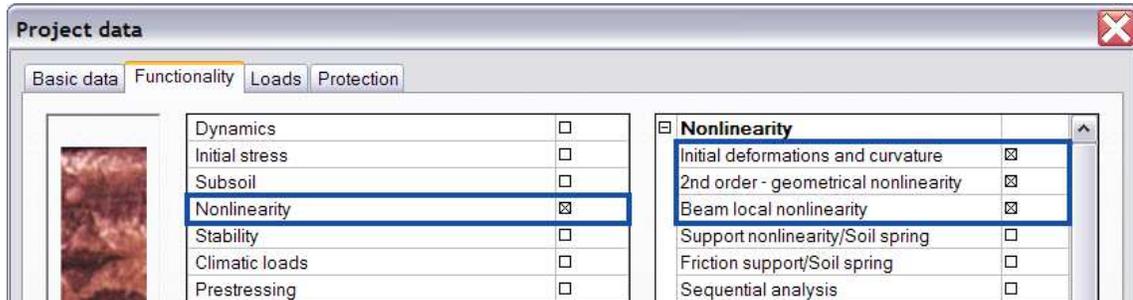
Contrôle unité pour l'ELU

→ Le contrôle combiné compression et flexion et décisif



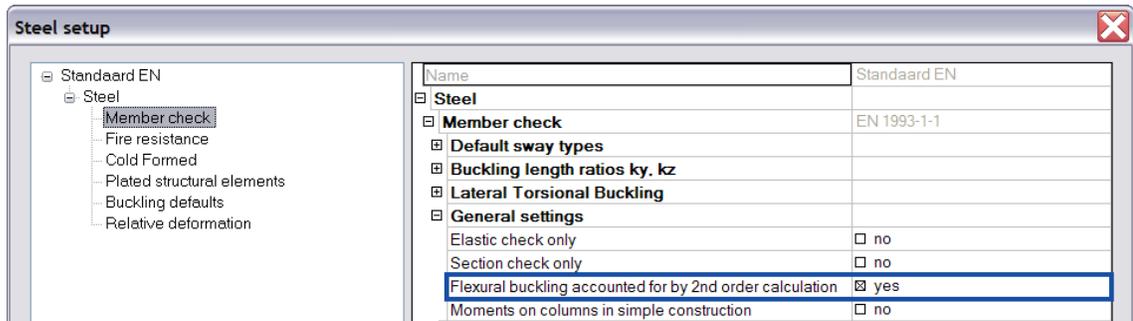
Chemin 2c Analyse au 2nd ordre – Imperfection globale (inclinaison initiale) + imperfection locale (courbure)

Fonctionnalités



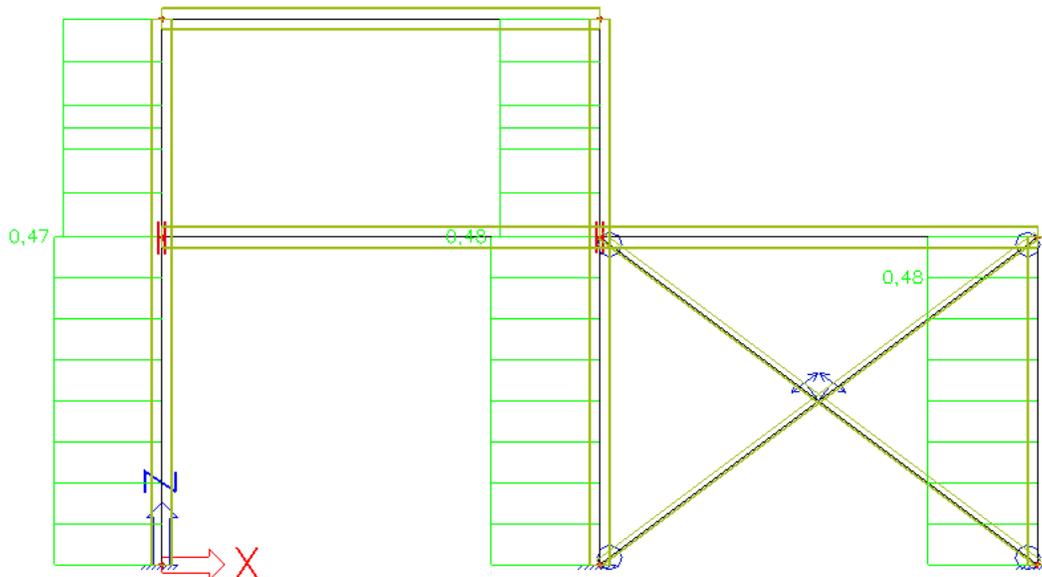
Configuration Acier

Selon les Eurocodes, il n'est plus nécessaire d'exécuter le contrôle de flambement flexionnel. SCIA Engineer va exécuter le contrôle de flambement flexionnel avec $k = 0,001$, pour ne pas prendre en compte ce contrôle.



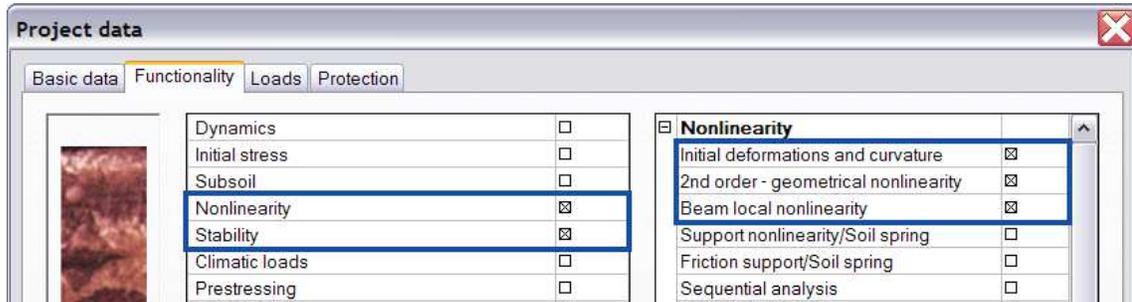
Contrôle unité pour l'ELU

→ Le contrôle combiné de compression et flexion est décisif

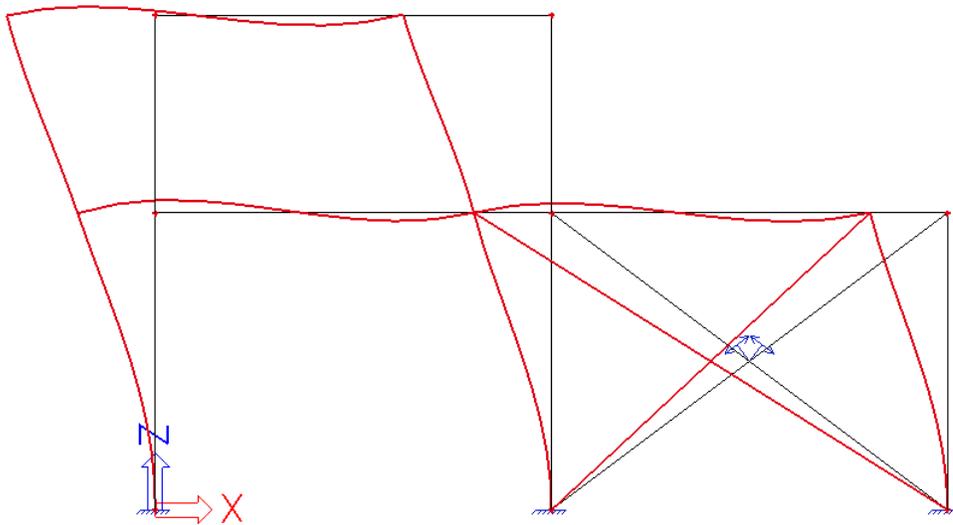


Chemin 3 Analyse au 2nd ordre – Forme de flambement remplace l'imperfection locale et globale

Fonctionnalités



Premier mode de flambement

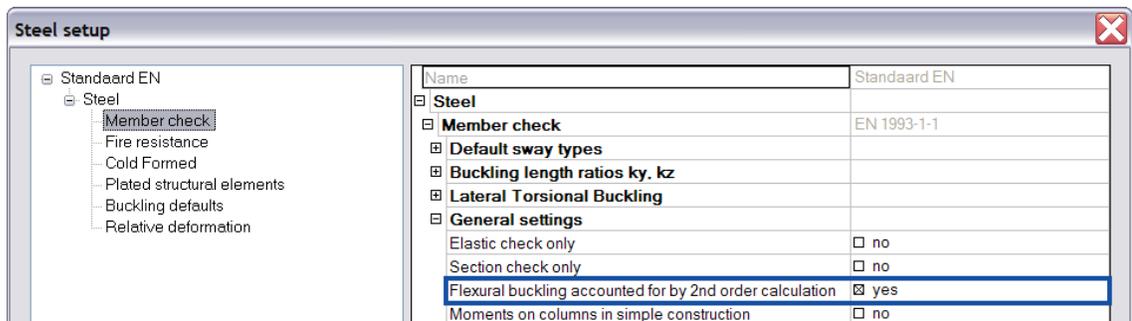


Calcul de η_{init} → A introduire comme 'déformation max.' (Voir la fenêtre 'Combinaison non linéaires')

Configuration Acier

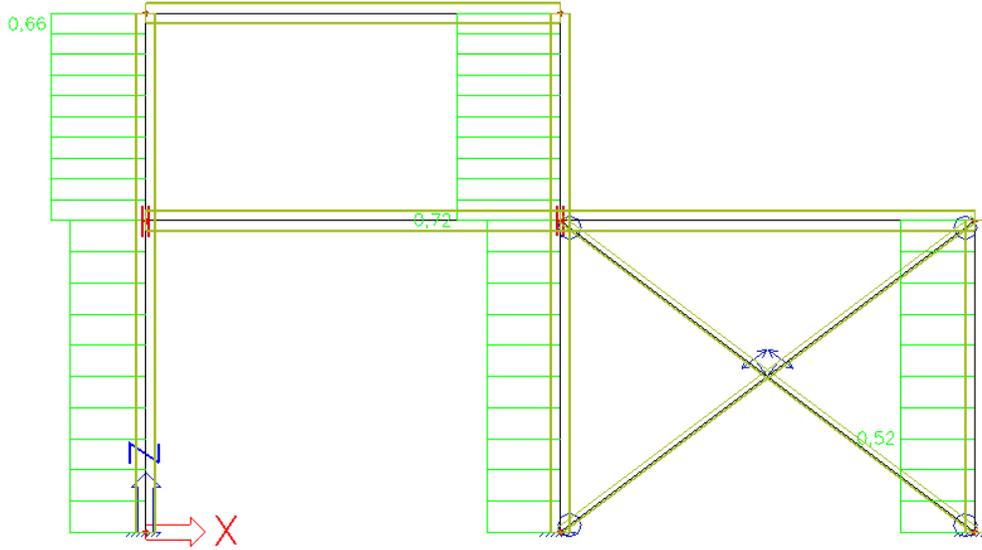
Selon les Eurocodes, il n'est plus nécessaire d'exécuter le contrôle de flambement flexionnel.

SCIA Engineer va exécuter le contrôle de flambement flexionnel avec $k = 0,001$, de telle sorte que celui-ci est négligé.



Contrôle unité à l'ELU

→ Le contrôle combiné compression et flexion est décisif



Contrôle ELS

Déplacement des nœuds

Le déplacement des nœuds définit les déformations globales maximales dans la direction verticale et les directions horizontales.

Les valeurs suivantes sont contrôlées dans l'exemple ci-dessous :

- Limite pour les déformations horizontales δ : $h/150$
- Limite pour la déformation verticale δ_{\max} : $L/200$

Exemple: Industrial Hall.esa

Affichez "Résultats -> Déplacement des nœuds" et regardez la combinaison CO2 – ELS.

Déformation horizontale

Le déplacement maximum dans la direction X est 25.3mm sur une hauteur de 6.9m.
Et dans la direction Y, 27.4mm sur une hauteur de 8.1m.

Limite pour la déformation horizontale δ : $h/150$

$$\begin{aligned} \Rightarrow 6900/150 &= 46 \text{ mm} && \rightarrow 25.3\text{mm} < 46 \text{ mm} && \rightarrow \text{OK} \\ \Rightarrow 8100/150 &= 54 \text{ mm} && \rightarrow 27.4\text{mm} < 54\text{mm} && \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

Déformation verticale

La déformation maximale dans la direction Z est 59.6 mm

Limite pour la déformation verticale δ : $L/200$

$$\Rightarrow 60000/2000 = 300 \text{ mm} \quad \rightarrow 59.6 \text{ mm} < 300 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{OK}$$

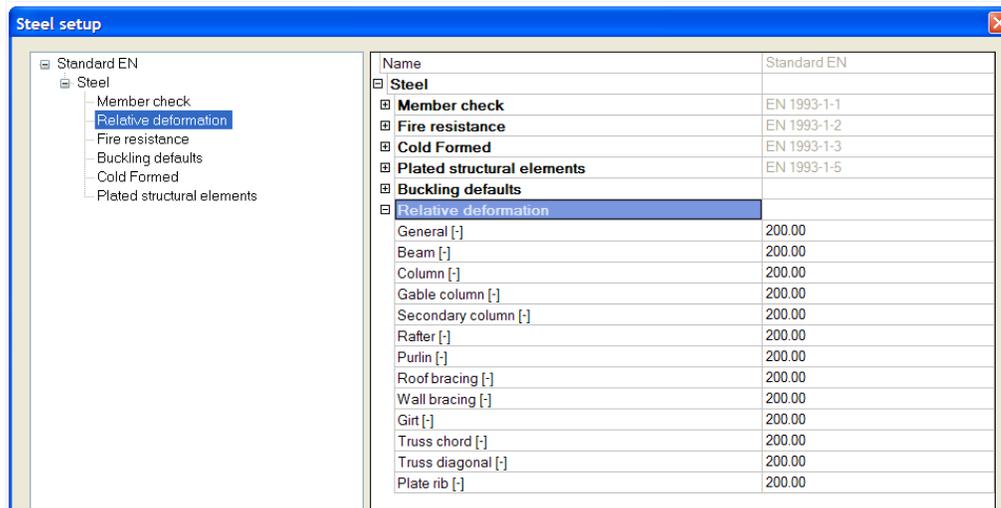
Displacement of nodes

Linear calculation, Extreme : Global
Selection : All
Combinations : CO2

Node	Case	Ux [mm]	Uy [mm]	Uz [mm]	Fix [mrad]	Fiy [mrad]	Fiz [mrad]
N113	CO2/1	-25.3	-0.5	-0.2	-1.3	0.4	0.0
N114	CO2/2	25.3	-0.5	-0.2	-1.3	-0.4	0.0
N70	CO2/3	0.0	-27.4	0.0	1.5	0.0	1.2
N60	CO2/4	0.0	27.4	0.0	-1.5	0.0	1.2
N109	CO2/5	12.7	0.1	-59.6	-0.1	-0.2	0.0
N82	CO2/6	9.8	-8.6	13.7	-24.8	-0.2	1.7
N80	CO2/6	9.5	-9.6	0.0	-27.6	0.0	1.2
N179	CO2/7	-9.5	9.6	0.0	27.6	0.0	1.2
N116	CO2/8	-9.1	-0.1	-21.9	-0.4	-6.0	0.0
N112	CO2/5	9.1	-0.1	-21.9	-0.4	6.0	0.0
N95	CO2/7	-9.6	-9.0	0.0	-26.0	0.0	-4.0
N87	CO2/6	9.6	-9.0	0.0	-26.0	0.0	4.0

Déformation relative

Pour chaque type de barre, les valeurs limite pour les déformations relatives sont fixées en utilisant le menu "Acier -> Barres -> Configuration -> Déformations relatives" :



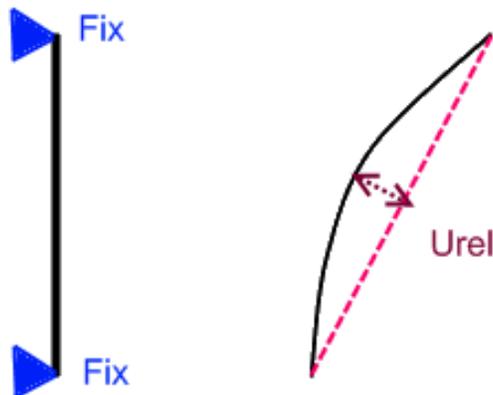
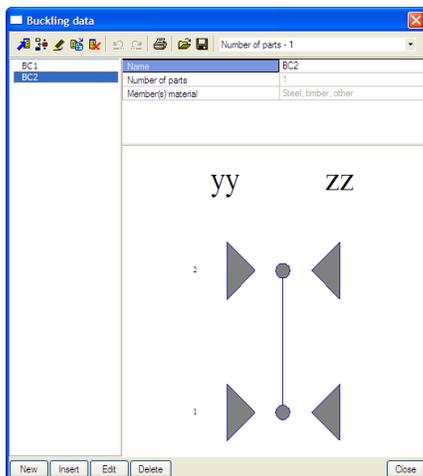
Avec l'option "Acier -> Barres -> Contrôles ELS – Déformation relative", les déformations relatives peuvent être contrôlées. Les déformations relatives sont données comme valeur absolue, valeur relative rapportée à la portée ou comme contrôle unité rapportée à la valeur limite.

La portée est définie dans le menu "Flambement et longueurs relatives".

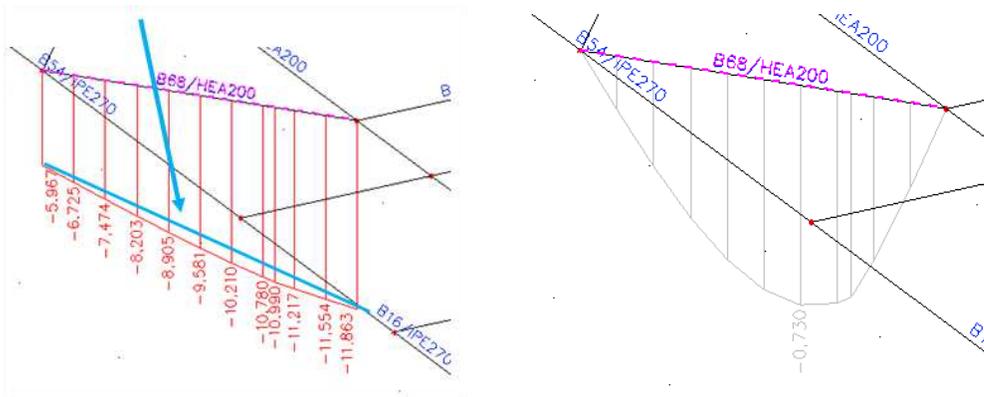
Deux options sont disponibles pour cette portée et expliquée ci-dessous :

2 nœuds appuyés

Lorsque deux nœuds sont appuyés dans ce menu comme montré ci-dessous, la déformation est prise comme étant la déflexion maximale de la barre en comparaison avec une ligne connectant les deux nœuds d'extrémité :



Ci-dessous, un exemple de ce principe :



Calcul pour cette déformation relative :

Déformation sur le début de la barre = 5,967mm et sur la fin = 11,863mm.

La déformation max se trouve sur 0,979m à partir du début de la barre.
Ce point s'est donc déjà déplacé de 9,5mm (voir la ligne bleue sur l'image) :

$$u_{z, \text{blue line}; 0,979\text{m}} = 5,967\text{mm} + \frac{0,979\text{m}}{1,632\text{m}} * (11,863\text{mm} - 5,967\text{mm}) = 9,504\text{mm}$$

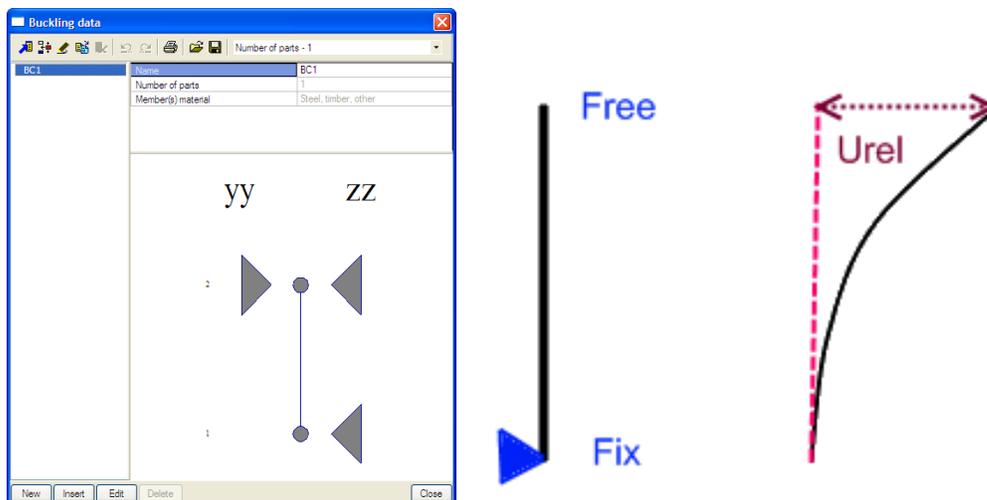
Et $u_{z, \text{relative}} = 10,2\text{mm} - 9,5\text{mm} = 0,7\text{mm}$

Supposons que la longueur de cette barre est = 1632mm:

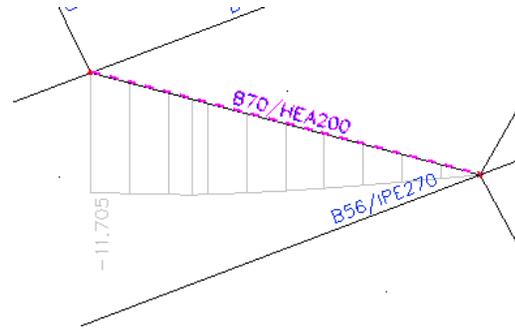
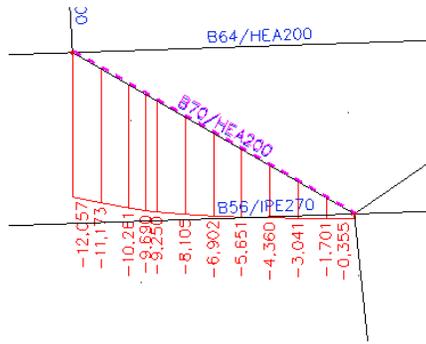
$$\Rightarrow \text{rel } u_z = \frac{0,73\text{mm}}{1632\text{mm}} = 1/2236$$

1 nœud appuyé et l'autre libre

Ceci est le cas si un nœud d'extrémité est libre :



Ci-dessous un exemple qui illustre ce principe :



La déformation relative max est prise comme étant la déformation moins la déformation du nœud fixe.

Et $u_{z, \text{relative}} = 12,057\text{mm} - 0,355\text{mm} = 11,7\text{mm}$

Et supposons que la longueur de cette barre = 1632mm:

$$\Rightarrow \text{rel uz} = \frac{11,7\text{mm}}{1632\text{mm}} = 1/139$$

Ce principe est maintenant montré dans l'exemple du 'industrial hall'.

Exemple: Industrial hall

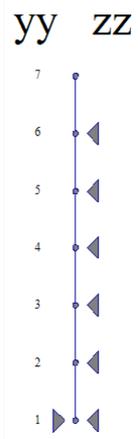
Considérons la barre B10.

Relative deformation

Linear calculation, Extreme : Global, System : Principal
 Selection : B10
 Combinations : CO1

Case - combination	Member	dx [m]	uy [mm]	Rel uy [1/xx]	Check uy [-]	uz [mm]	Rel uz [1/xx]	Check uz [-]
CO1/2	B10	15.075	-0.4	1/2074	0.10	-37.1	1/406	0.49
CO1/4	B10	15.075	0.4	1/2095	0.10	30.5	1/495	0.40
CO1/3	B10	13.751	0.0	1/10000	0.00	-84.6	1/178	1.12
CO1/5	B10	13.751	0.0	1/10000	0.00	35.5	1/425	0.47

Autour de l'axe y-y (dans la direction z), seul le premier nœud a été appuyé :



Longueur = 15,075 m

Déformation uz = 84.6 mm (et 0 mm au début de la barre)

$u_{z, \text{relative}} = 84.6\text{mm} - 0.0\text{mm} = 84.6\text{mm}$

$u_{z, \text{relative}} / \text{Longueur} = 84.6\text{mm} / 15075\text{mm} = 1/178$

Contrôle = $\frac{1/178}{1/200} = 1,12$

Contrôle de résistance au feu - Pas dans l'édition concept

Pour le calcul de la résistance au feu, une édition Professional ou Expert est nécessaire. Le contrôle de résistance au feu a été introduit dans le module esasd.05.xx (esasd.05.01 pour l'EC-EN).

Général

Le contrôle de résistance au feu dans SCIA Engineer a été introduit selon l'EN 1993-1-2 – modèle simple de calcul.

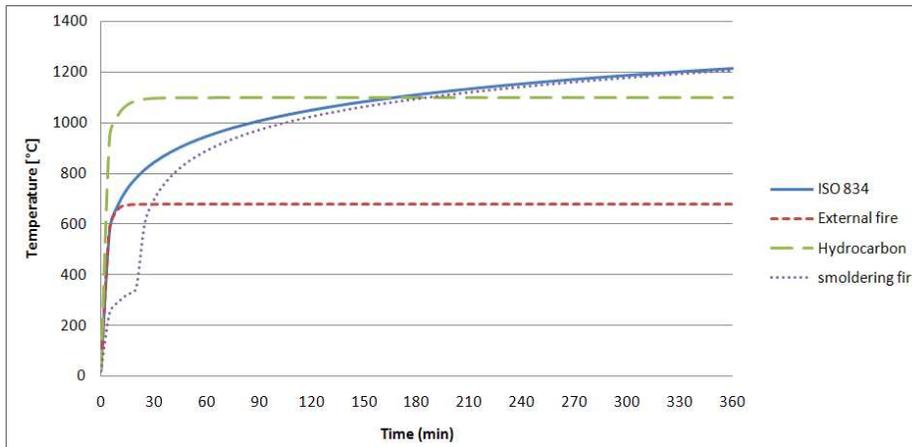
Pour une certaine courbe de température qui est sélectionnée, la température dans le matériau est calculée après une période requise. Les propriétés du matériau sont ensuite adaptées selon cette température.

Les niveaux de sécurité au feu qui sont requis dépendent de coefficients comme :

- type d'occupation
- hauteur et taille du bâtiment
- efficacité de l'action des pompiers
- mesures actives comme l'installation de sprinkleurs

Courbes Température temps

L'utilisateur peut choisir entre 4 courbes température-temps dans SCIA Engineer :



Courbe température-temps standard : $\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$ [°C]
 $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$

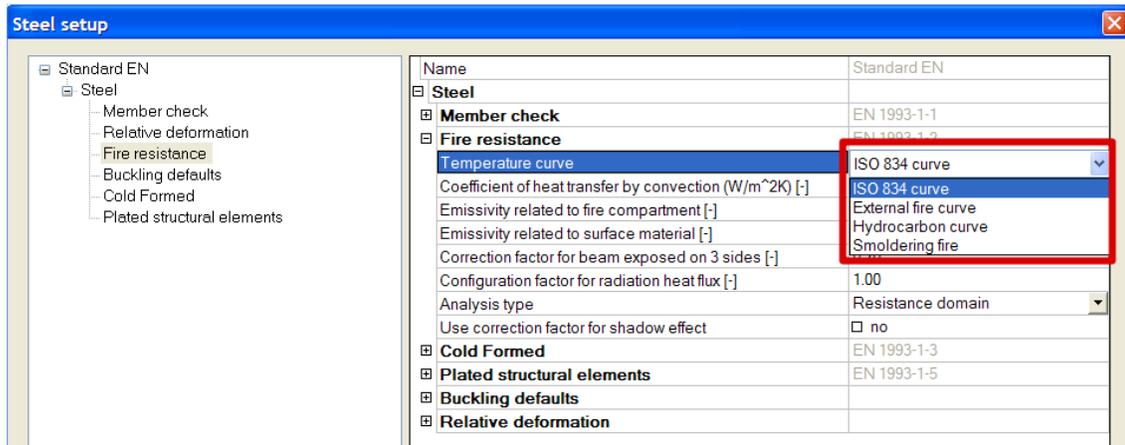
Courbe de feu externe : $\theta_g = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}) + 20$ [°C]
 $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$

Courbe hydrocarbure : $\theta_g = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20$ [°C]
 $\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$

Feu couvant : $\theta_g = 154\sqrt[4]{t} + 20$ [°C]

Pendant 20 minutes, suivi par la courbe standard ISO 834

Cela peut être configuré dans “Acier -> Barres -> Configuration Acier” :



Il s'agit de la température de l'aire en fonction du temps.

Température de l'Acier

La température de l'acier sera calculée après un certain temps avec les formules suivantes. Il sera supposé que cette température d'acier est une température uniforme sur toute la section :

Élément en acier non protégé :

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

Élément en acier protégé :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p/V}{d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{(1 + \phi/3)} \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t}$$

Où :

k_{sh} Coefficient de correction pour l'effet d'ombre

Pour les sections I sous les actions nominales de feu : $k_{sh} = 0.9 [A_m/V]_b / [A_m/V]$

Tous les autres cas : $k_{sh} = [A_m/V]_b / [A_m/V]$

A_m/V Coefficient de section pour les éléments non protégés en acier [1/m]

Dans le tableau 4.2 (EN 1993-1-2) quelques coefficients de section sont calculés pour les éléments non protégés en acier.

$[A_m/V]_b$ the box value for the section factor

\dot{h}_{net} la valeur de dimensionnement sur le flux thermique net par unité de surface [W/m²]
Cette valeur doit être obtenue de l'EN 1991-1-2 avec $\varepsilon_f = 1,0$ et $\varepsilon_m = 0,7$.

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \cdot A_p/V$$

A_p/V Coefficient de section – voir aussi le tableau 4.3. EN 1993-1-2

Le flux thermique net peut être calculé selon l'EN 1991-1-2 article 3.1:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,r} + \dot{h}_{net,c}$$

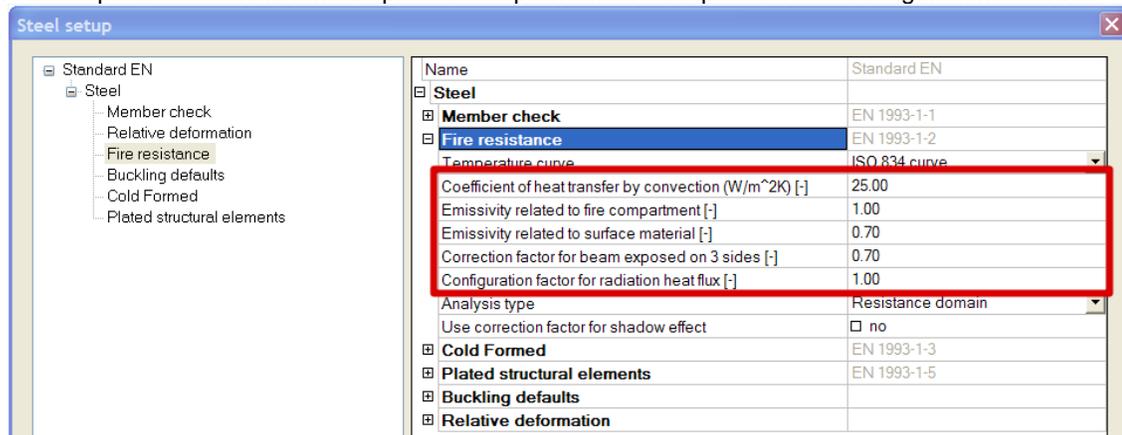
$$\begin{aligned} \dot{h}_{net,c} &= \text{transfert de chaleur par convection} \\ &= \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{h}_{net,r} &= \text{transfert de chaleur par radiation} \\ &= \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \end{aligned}$$

Avec

α_c	Coefficient de transfert de chaleur par convection [W/m ² K]
θ_g	La température du gaz au voisinage de l'élément exposé au feu [°C] cette température peut être adoptée comme courbe nominal température-temps comme donné ci-dessous
θ_m	La température de surface de l'élément [°C]
σ	Constante de Stephan Boltzmann (=5,67 · 10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
ε_m	Emissivité de surface = 0,7 (EN 1993-1-2)
ε_f	Emissivité du feu = 1
Φ	Coefficient de configuration - $\Phi = 1,0$. Une valeur plus petite peut être choisie pour prendre en compte les effets de position et d'ombre (le calcul est donné dans l'EN 1991-1-2 –Annexe G).
θ_r	est la température effective de radiation de l'environnement du feu [°C] Dans le cas où les éléments sont entièrement entourés par le feu, la température de radiation θ_r peut être représentée par la température du gaz θ_g autour de cet élément.

Tous les paramètres de la formule précédente peuvent être adaptés dans la Configuration Acier :



Propriétés de l'Acier

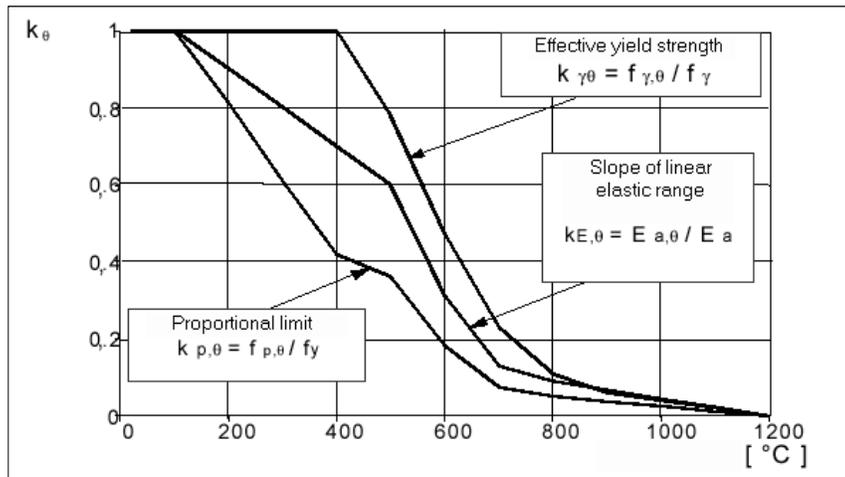
La plupart des propriétés de l'acier seront modifiées par une température différente, une fois que la température de l'acier est connue, les propriétés de l'acier peuvent être calculées. Ci-dessous les propriétés pour l'acier au carbone de l'EN 1993-1-2, art.3. Les propriétés pour l'acier inoxydable peuvent être trouvées dans l'EN 1993-1-2: 2005: Annexe C.

Coefficients de réduction

Limite d'élasticité effective, relatif à la limite d'élasticité à 20°C: $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$

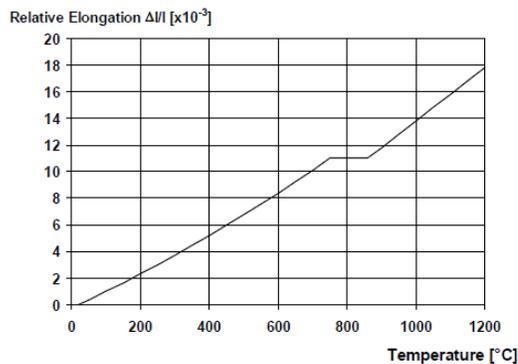
Limite proportionnelle, relatif à la limite d'élasticité à 20°C: $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$

Pente du domaine élastique linéaire, relatif à la pente à 20°C: $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$



Elongation thermique

L'élongation thermique relative de l'acier $\Delta l / l$ doit être déterminée à partir de ce qui suit :



Pour $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4}$$

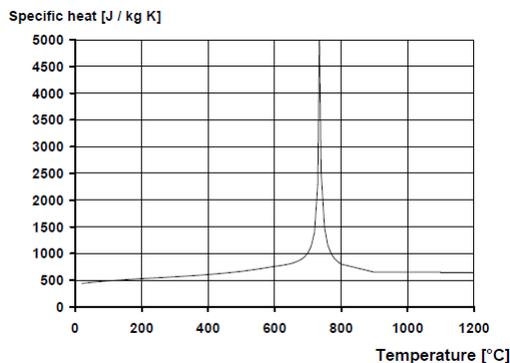
Pour $750^\circ\text{C} \leq \theta_a < 860^\circ\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,1 \times 10^{-2}$$

Pour $860^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3}$$

Chaleur spécifique



Pour $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$:

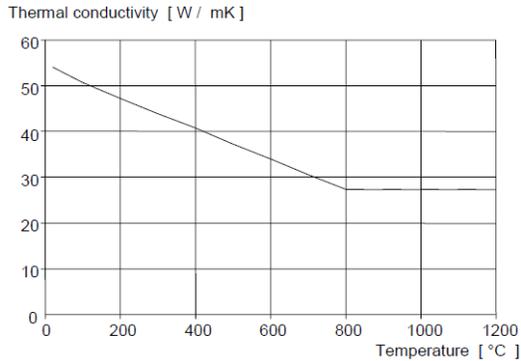
$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \text{ J/kgK}$$

Pour $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$: $c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK}$

Pour $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$: $c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK}$

Pour $900^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C}$: $c_a = 650 \text{ J/kgK}$

Conductivité thermique



Pour $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$:

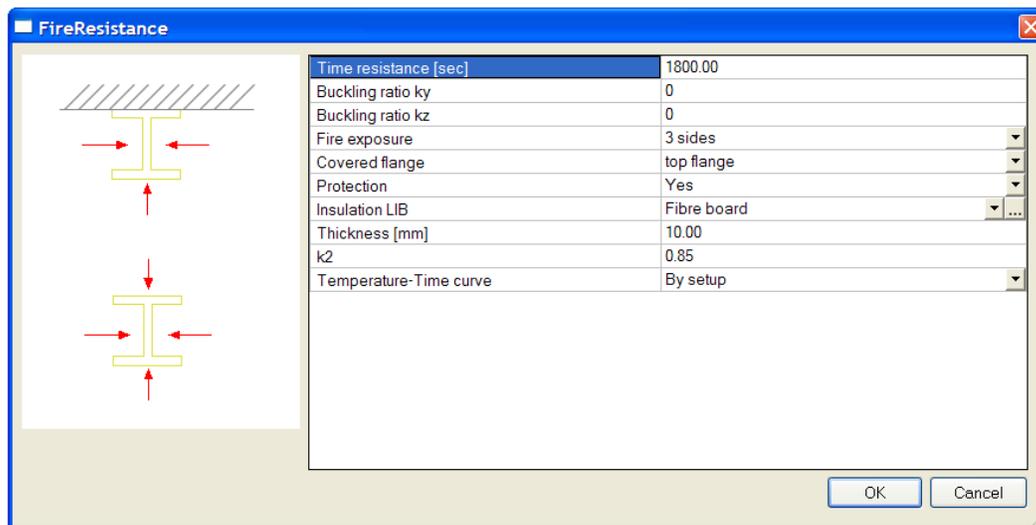
$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK}$$

Pour $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \text{ W/mK}$$

Propriété de résistance au feu dans SCIA Engineer

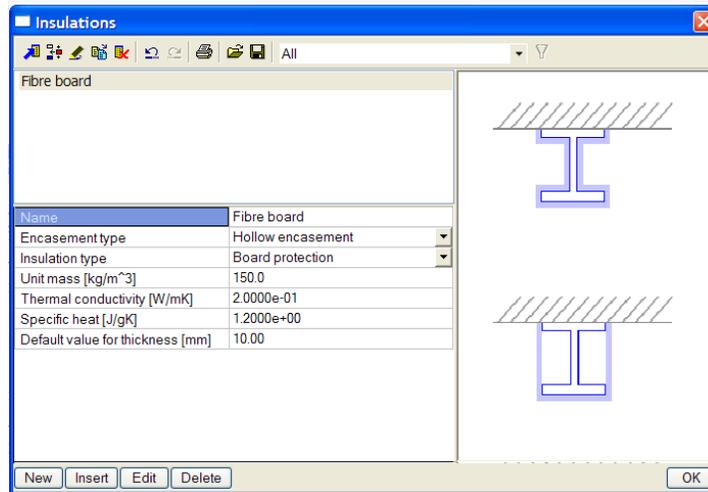
Dans SCIA Engineer, l'utilisateur peut introduire les propriétés de résistance au feu sur un élément en acier avec "Acier -> Barres -> Données de contrôle de l'élément -> Résistance au feu" :



Où :

- Durée de résistance : spécifie la résistance au feu requise
- Coeff flambement ky : Lorsque ce coefficient est supérieur à 0,0, le coefficient de flambement 'normal' défini ky sera remplacé par cette valeur.
- Coeff flambement kz : Lorsque ce coefficient est supérieur à 0,0, le coefficient de flambement 'normal' défini kz sera remplacé par cette valeur.
- Exposition au feu : La section peut être exposée au feu par tous les côtés ou sur seulement trois côtés.
- Exposition au feu : Lorsque la section est exposée au feu seulement par trois côtés, la semelle qui est recouverte peut être choisie ici.
- Protection: Définit si la section est protégée ou pas.

Bibl. isolation : Ici les propriétés d'isolation peuvent être introduites :



Epaisseur [mm]: Epaisseur d'isolation.

k₂: Ce paramètre est le coefficient d'adaptation pour une distribution non uniforme de température sur la longueur de la barre. Ce coefficient κ_2 est utilisé pour le contrôle du moment résistant de dimensionnement $M_{fi,\theta,Rd}$.

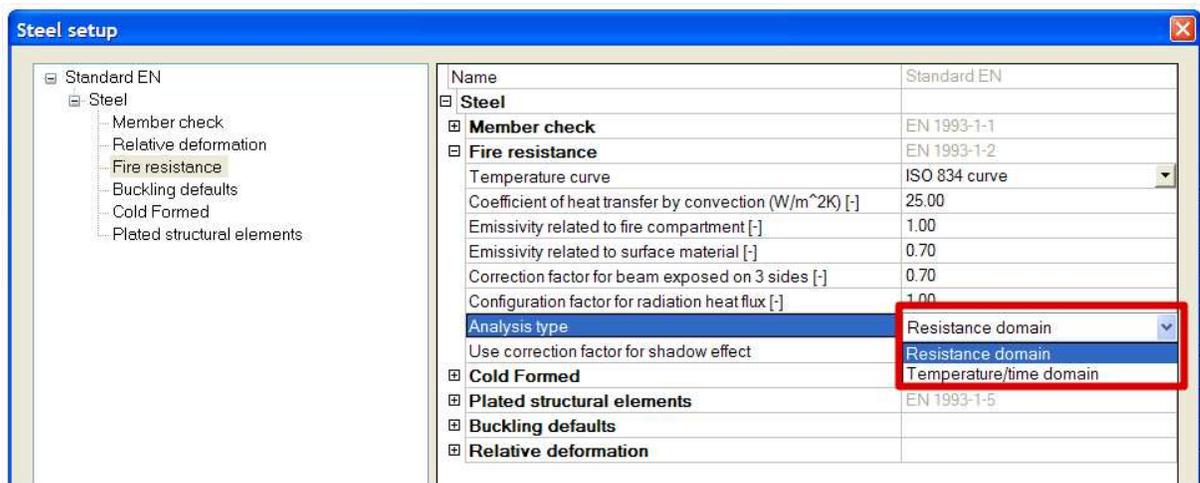
Courbe Température-Temps : L'utilisateur peut choisir un autre température temps comme défini dans la configuration acier ou peut même introduire sa propre courbe température-temps ici.

Domaine de résistance

Dans SCIA Engineer, deux méthodes de calcul sont implémentées :

- Domaine de résistance
- Domaine Température temps

Le choix entre ces types d'analyse peut être fait dans "Acier -> Barres -> Configuration Acier" :



Dans ce chapitre, le contrôle de résistance au feu selon le domaine de Résistance sera expliqué et dans le paragraphe selon le domaine de Température/temps.

Principe

L'utilisateur va choisir la courbe de température temps utilisée et va introduire un temps de résistance au feu requis. Après ce temps, la température du gaz et ensuite celle de l'acier seront calculées.

Avec cette température d'acier, les propriétés réduites seront calculées et un contrôle de résistance au feu selon l'EN 1993-1-2, art. 4 sera exécuté avec ces propriétés d'acier adaptées. Ce contrôle va donner un contrôle unité qui est le contrôle de résistance au feu pour le domaine de résistance.

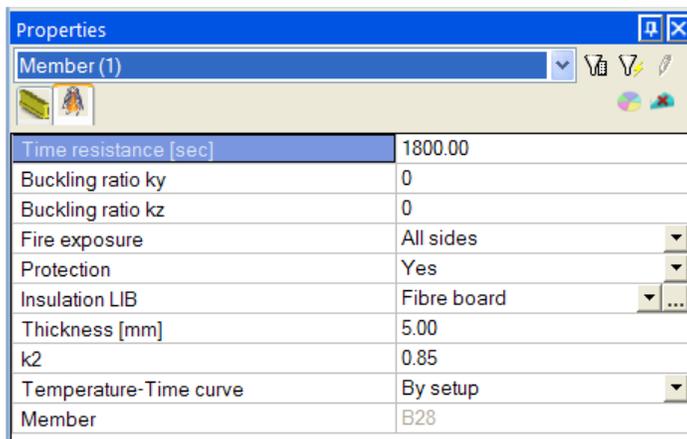
Exemple dans SCIA Engineer

Ce principe est expliqué avec un exemple dans SCIA Engineer.

Exemple: Industrial hall.esa

Considérons l'élément B28 :

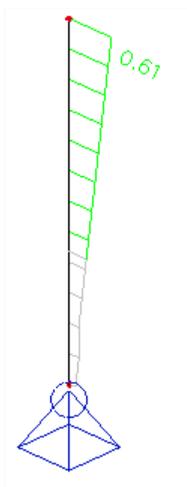
Propriétés de résistance au feu suivantes sont introduites sur ce poteau :



Properties	
Member (1)	
Time resistance [sec]	1800.00
Buckling ratio ky	0
Buckling ratio kz	0
Fire exposure	All sides
Protection	Yes
Insulation LIB	Fibre board
Thickness [mm]	5.00
k2	0.85
Temperature-Time curve	By setup
Member	B28

La résistance au feu sera donc contrôlée après 30 minutes (= 1800 secondes) avec une protection de type Panneaux de fibre et les coefficients de flambement sont pris égaux aux coefficients de flambement du contrôle acier normal.

Le contrôle de résistance est exécuté via "Acier -> Barres -> contrôle ELU -> Contrôle – résistance au feu" pour ce poteau et pour la combinaison "CO3 - Feu", en donnant un contrôle unité de 0.61 :



En regardant la sortie par défaut, ce calcul est donné par SCIA Engineer:

Les coefficients de sécurité sont d'abord affichés :

Basic data EC3 : EN 1993	
partial safety factor Gamma M0 for resistance of cross-sections	1.00
partial safety factor Gamma M1 for resistance to instability	1.00
partial safety factor Gamma M2 for resistance of net sections	1.25
partial safety factor Gamma M,fi for fire resistance	1.00

Les propriétés (pas adaptés par la température) du matériau sont ensuite donnés :

Material data		
yield strength fy	235.0	MPa
tension strength fu	360.0	MPa
fabrication	rolled	

Les propriétés de résistance au feu comme introduits dans SCIA Engineer sont aussi affichés. Ici, il est aussi indiqué que le contrôle de résistance au feu a été exécuté après 30 minutes de feu.

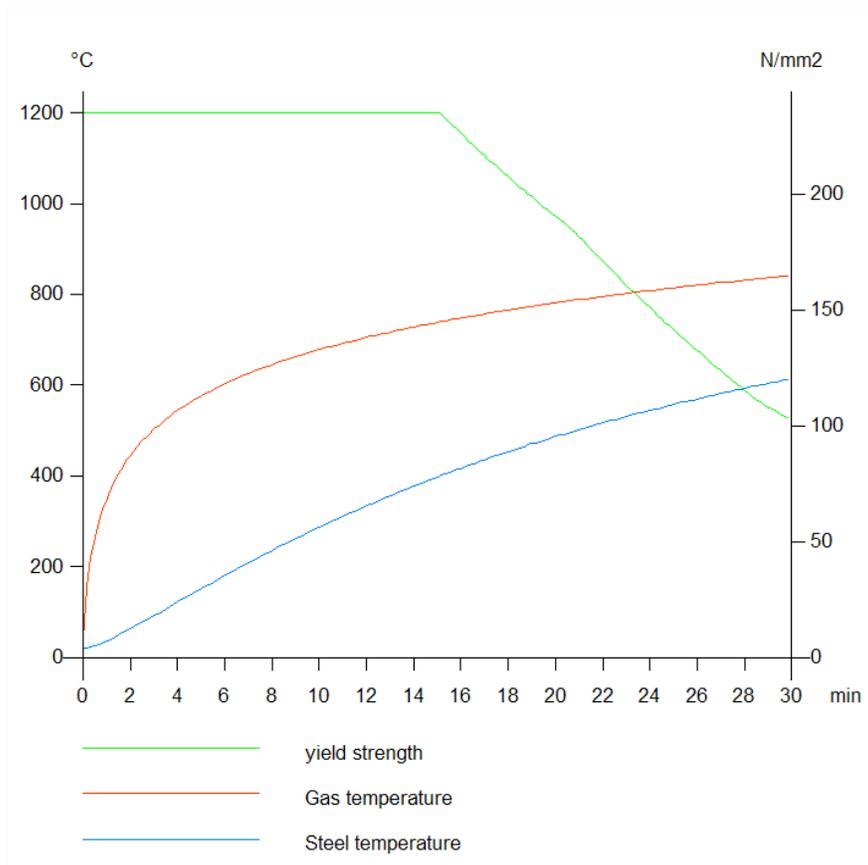
Fire resistance according to EN 1993-1-2 in resistance domain.

Results are given for checks at time t = 30.0 min

Fire resistance data		
Temperature-time curve	Standard temperature-time curve (ISO 834)	
Coefficient of heat transfer by convection Alfa,c	25.00	W/m2K
Emissivity related to fire compartment Epsilon,f	1.00	
Emissivity related to surface material Epsilon,m	0.70	
Configuration factor for radiation heat flux Fi	1.00	
Required fire resistance	30.00	min
Material temperature Teta a,t	614.72	°C
Gas temperature Teta,g	841.80	°C
Correction factor Kappa 1	1.00	
Correction factor Kappa 2	0.85	
Beam exposure	All sides	
ky,Teta	0.43	
kE,Teta	0.28	

Insulation properties		
Name:	Fibre board	
Thickness	5.00	mm
Incasement type	Hollow encasement	
Insulation type	Board	
Unit mass	150.0	kg/m^3
Thermal conductivity	0.20	W/mK
Specific heat	1200.00	J/kgK
Ap/V	0.116	1/mm

Un graphique est maintenant affiché avec la température du gaz (dans cet exemple, il s'agit de la courbe ISA 834), la température de l'acier calculée avec une protection et la réduction de la limite d'élasticité.



Ensuite tous les contrôles unité sont affichés avec les propriétés réduites :

....:SECTION CHECK:....

Width-to-thickness ratio for internal compression parts (EN 1993-1-1 : Tab.5.2. sheet 1).
 ratio 59.57 on position 0.000 m

ratio		
maximum ratio	1	28.05
maximum ratio	2	32.30
maximum ratio	3	35.70

==> Class cross-section 4

Width-to-thickness ratio for outstand flanges (EN 1993-1-1 : Tab.5.2. sheet 2).
 ratio 6.40 on position 0.000 m

ratio		
maximum ratio	1	7.65
maximum ratio	2	8.50
maximum ratio	3	11.90

==> Class cross-section 1

The critical check is on position 6.900 m

Internal forces		
N _{fi,Ed}	-61.02	kN
V _{y,fi,Ed}	-0.01	kN
V _{z,fi,Ed}	-34.87	kN
M _{t,fi,Ed}	0.00	kNm
M _{y,fi,Ed}	-240.62	kNm
M _{z,fi,Ed}	-0.05	kNm

Compression check

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.2 and formula (4.5)
Section classification is 2.

Table of values		
N _{fi,t,Rd}	1787.55	kN
Unity check	0.03	-

Shear check (Vy)

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.3 and formula (4.16)

Table of values		
V _{y,fi,t,Rd}	544.42	kN
Unity check	0.00	-

Shear check (Vz)

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.3 and formula (4.16)

Table of values		
V _{z,fi,t,Rd}	585.15	kN
Unity check	0.06	-

Bending moment check (My)

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.3. and formula (4.10)
Section classification is 2.

Table of values		
M _{fi,t,Rd}	584.63	kNm
Unity check	0.41	-

Bending moment check (Mz)

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.3. and formula (4.10)
Section classification is 2.

Table of values		
M _{fi,t,Rd}	73.80	kNm
Unity check	0.00	-

Combined bending, axial force and shear force check

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.3. and formula (4.9)
Section classification is 2.

Table of values		
MNV _{y,fi,t,Rd}	584.63	kNm
MNV _{z,fi,t,Rd}	73.80	kNm

alfa 2.00 beta 1.00
Unity check 0.17 -

Element satisfies the section check !

...: STABILITY CHECK:...

Calculation effective area properties with direct method.

Properties					
sectional area A eff	1.5269e+04	mm ²			
Shear area V _y eff	8.9420e+03	mm ²	V _z eff	6.3269e+03	mm ²
radius of gyration i _y eff	320.39	mm	i _z eff	58.15	mm
moment of inertia I _y eff	1.5674e+09	mm ⁴	I _z eff	5.1634e+07	mm ⁴
elastic section modulus W _y eff	4.1630e+06	mm ³	W _z eff	3.9265e+05	mm ³
Eccentricity e _{ny}	0.00	mm	e _{nz}	0.00	mm

Flexural Buckling Check

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.2 & Annex E and formula (4.5)

Buckling parameters	yy	zz	
Sway type	sway	non-sway	
System Length L	6.900	6.900	m
Buckling factor k	3.25	0.99	
Buckling length Lcr	22.415	6.832	m
Critical Euler load Ncr	6596.08	2293.84	kN
Slenderness	74.15	125.75	
Relative slenderness Lambda	0.91	1.55	
Limit slenderness Lambda ₀	0.20	0.20	

The slenderness or compression force is such that Flexural Buckling effects may be ignored according to EN 1993-1-1 article 6.3.1.2(4)

Lateral Torsional Buckling Check

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.4 & Annex E and formula (4.19)

LTB Parameters		
Method for LTB curve	Art. 6.3.2.2.	
W _y	4.1630e+06	mm ³
Elastic critical moment M _{cr}	1709.12	kNm
Relative slenderness Lambda _{LT}	0.94	
Limit slenderness Lambda _{LT,0}	0.40	

The slenderness or bending moment is such that Lateral Torsional Buckling effects may be ignored according to EN 1993-1-1 article 6.3.2.2(4)

Compression and bending check

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.5 & Annex E and formula (4.21c), (4.21d)

Table of values	
ky	1.008
kz	1.012
k _{lt}	0.990
Beta My	1.800
Beta Mz	1.800
Beta M _{lt}	1.800
mu y	-0.197
mu z	-0.313
mu _{lt}	0.268

Unity check (4.21c) = 0.04 + 0.57 + 0.00 = 0.61

Unity check (4.21d) = 0.04 + 0.56 + 0.00 = 0.60

Element satisfies the stability check !

Dans cet exemple, le **Contrôle compression et flexion** va donner un contrôle unité de **0.61**.

Domaine Température/temps

2 méthodes de calcul sont implémentées dans SCIA Engineer :

- Domaine de résistance
- Domaine Température temps.

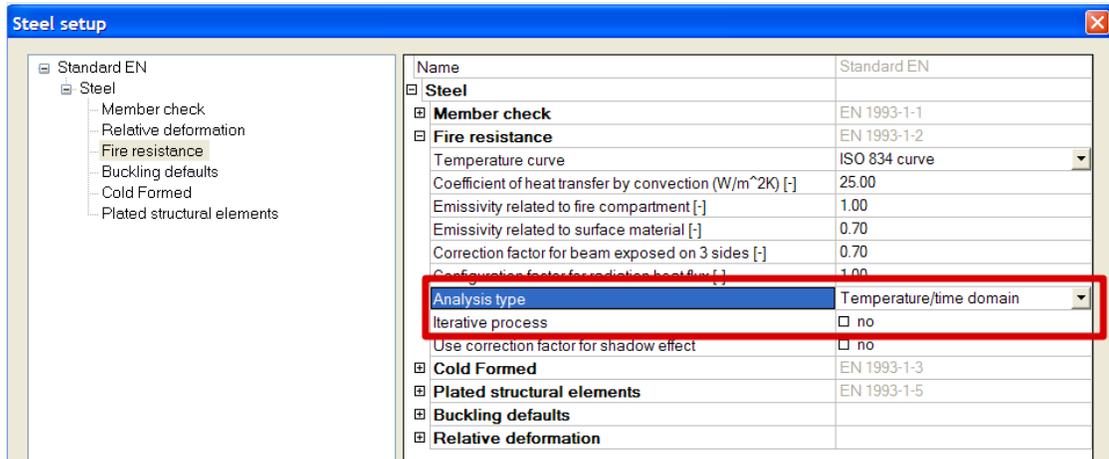
Le choix entre ces deux types d'analyse peut être fait dans "Acier -> Barres -> Configuration Acier". Dans ce chapitre, le contrôle de résistance selon le domaine Température/temps sera expliqué.

Principe

L'utilisateur va choisir la courbe température temps utilisée et va introduire un temps requis de résistance au feu. Après ce temps, la température du gaz et par la suite la température de l'acier seront calculés.

La température critique dans l'acier sera aussi calculée et le contrôle de résistance au feu selon le domaine température/temps va être le rapport de la température réelle de l'acier après un temps choisi et la température critique de l'acier.

La température critique de l'acier $\theta_{a,cr}$ peut être calculée à l'aide d'une formule simple ou bien d'une manière itérative. Ce choix peut être fait dans "Acier -> Barres -> Configuration Acier" :



Lorsque le **processus itératif n'est pas coché**, la température critique de l'acier est 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 degré d'utilisation. Cela veut dire le contrôle unité selon l'EN 1993-1-2 au temps = 0sec, donc sans augmentation de la température.

REMARQUE

Cette formule simple est seulement valable si un phénomène de stabilité ou un critère de déformation doit être pris en compte.

Lorsque l'**option de processus itératif est activée**, la température critique de l'acier sera calculée avec un processus itératif. Une estimation de cette température critique va d'abord être choisie et le contrôle unité selon l'EN 1993-1-2 sera exécuté, si ce contrôle est inférieur à un, une valeur plus élevée de la température critique est choisie ou lorsque ce contrôle est plus grand que un, une valeur plus petite de température est choisie. Ce contrôle unité est maintenant réexécuté jusqu'à ce qu'il donne un résultat entre 0.99 et 1.01 pour cette valeur de température critique d'acier.

Ceci est une procédure plus précise pour calculer la température critique et cette méthode est aussi valable lorsqu'un phénomène de stabilité ou un critère de déformation doit être pris en compte.

Exemple dans SCIA Engineer

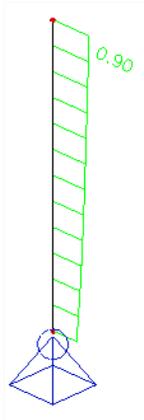
Le principe est expliqué à l'aide d'un exemple dans SCIA Engineer.

Exemple: Industrial hall.esa

Considérons l'élément B28:

Modifiez dans "Acier -> Barres -> Configuration acier" le type d'analyse en "Domaine Température/temps" sans activer l'option "processus itératif".

Le contrôle de résistance au feu est exécuté via "Acier -> Barres -> contrôle ELU -> Contrôle – résistance au feu" pour ce poteau et pour la combinaison "CO3 - Feu", résultant en un contrôle unité de 0.90 :



En regardant la sortie par défaut, ce calcul est donné par SCIA Engineer:

Fire resistance according to EN 1993-1-2 in time/temperature domain.

Results are given for checks at time $t = 0$ min.

Le contrôle selon, l'EN 1993-1-2 sera donc donné à $t = 0$ min, donc 20°C , sans aucune réduction des propriétés d'acier. Ce contrôle va donner un contrôle unité plus petit qui représente le degré d'utilisation μ_0 :

Dans cet exemple, le contrôle Compression et flexion va donner encore une fois le contrôle le plus élevé $= 0.26 = \mu_0$.

Compression and bending check

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.5 & Annex E and formula (4.21c), (4.21d)

Table of values	
ky	0.999
kz	1.001
klt	0.997
Beta My	1.800
Beta Mz	1.800
Beta Mlt	1.800
mu y	0.049
mu z	-0.063
mu lt	0.188

Unity check (4.21c) $= 0.02 + 0.25 + 0.00 = 0.26$

Unity check (4.21d) $= 0.02 + 0.25 + 0.00 = 0.26$

Cette valeur est utilisée dans une formule simple pour la température critique de l'acier :

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$$

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 (0.26)^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 683^{\circ}\text{C}$$

La température de l'acier après 30 minutes est 614.72°C .

Le contrôle unité est : $\frac{614.72^{\circ}\text{C}}{683.63^{\circ}\text{C}} = 0.90$

Toutes ces valeurs sont aussi données dans le tableau général dans l'aperçu du contrôle de résistance au feu :

Fire resistance according to EN 1993-1-2 in time/temperature domain.Results are given for checks at time $t = 0$ min.

Fire resistance data		
Temperature-time curve	Standard temperature-time curve (ISO 834)	
Coefficient of heat transfer by convection $\alpha_{f,c}$	25.00	W/m ² K
Emissivity related to fire compartment $\epsilon_{f,f}$	1.00	
Emissivity related to surface material $\epsilon_{f,m}$	0.70	
Configuration factor for radiation heat flux F_i	1.00	
Required fire resistance	30.00	min
Material temperature $\theta_{a,t}$	614.72	°C
Gas temperature $\theta_{a,g}$	841.80	°C
Critical temperature $\theta_{a,cr}$	683.63	°C
Fire resistance	37.68	min
Correction factor κ_1	1.00	
Correction factor κ_2	0.85	
Beam exposure	All sides	
Degree of utilization μ_0	0.26	
$k_y, \theta_{a,t}$	1.00	
$k_E, \theta_{a,t}$	1.00	

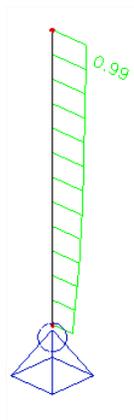
Le **Temps de résistance au feu** est aussi donné dans ce tableau :
Cet élément peut résister au feu pendant 37.68 minutes.

Remarque

Comme indiqué précédemment, cette méthode simple de calcul peut seulement être utilisée si aucun phénomène de stabilité ne doit être pris en compte. Dans cet exemple, la stabilité donne le contrôle le plus élevé, cette **méthode n'est donc pas correcte et ne doit pas être utilisée !**

Allez maintenant dans "Acier -> Barres -> Configuration acier" et cochez l'option "processus itératif".

Le contrôle de résistance au feu est exécuté via "Acier -> Barres -> contrôle ELU -> Contrôle - résistance au feu" pour ce poteau et pour la combinaison "CO3 - Feu", ce qui donne un contrôle unité de 0.99 :



En regardant la sortie détaillée, ce calcul est donné par SCIA Engineer:

Fire resistance according to EN 1993-1-2 in time/temperature domain.Results are given for checks at critical material temperature $\theta_{a,cr} = 622.7$ °C

Le contrôle suivant l'EN 1993-1-2 sera donné à $\theta_{a,cr} = 622.7$ °C. Cette température est calculée itérativement ce qui donne un contrôle unité selon l'EN 1993-1-2 égal à 1 :

Compression and bending check

According to article EN 1993-1-2 : 4.2.3.5 & Annex E and formula (4.21c), (4.21d)

Table of values	
ky	0.996
kz	1.003
kIt	0.988
Beta My	1.800
Beta Mz	1.800
Beta Mit	1.800
mu y	0.064
mu z	-0.047
mu It	0.183

Unity check (4.21c) = 0.06 + 0.93 + 0.00 = 1.00

Unity check (4.21d) = 0.06 + 0.92 + 0.00 = 0.99

Element satisfies the stability check !

Le contrôle unité le plus élevé sera en effet égal à 1.00 pour cette température critique.

Pour ce cas, le contrôle unité est : $\frac{614.72^{\circ}\text{C}}{622.68^{\circ}\text{C}} = 0.99$

Toutes ces valeurs sont aussi données dans le tableau général du contrôle de résistance au feu :

Fire resistance according to EN 1993-1-2 in time/temperature domain.Results are given for checks at critical material temperature $T_{e,a,cr} = 622.7^{\circ}\text{C}$

Fire resistance data		
Temperature-time curve	Standard temperature-time curve (ISO 834)	
Coefficient of heat transfer by convection Alfa,c	25.00	W/m ² K
Emissivity related to fire compartment Epsilon,f	1.00	
Emissivity related to surface material Epsilon,m	0.70	
Configuration factor for radiation heat flux Fi	1.00	
Required fire resistance	30.00	min
Material temperature Teta a,t	614.72	°C
Gas temperature Teta,g	841.80	°C
Critical temperatur Teta a,cr	622.68	°C
Fire resistance	30.78	min
Correction factor Kappa 1	1.00	
Correction factor Kappa 2	0.85	
Beam exposure	All sides	
ky,Teta	0.26	
kE,Teta	0.27	

Le Temps de réssistance au feu est aussi donné dans ce tableau :

Cet élément peut résister au feu pendant 30.78 minutes.

REMARQUE

Comme indiqué auparavant, cette méthode de calcul simple peut seulement être utilisée si aucun phénomène de stabilité n'a besoin d'être pris en compte. Dans cet exemple, la température critique de l'acier a été calculée en utilisant un processus itératif, **cette méthode est donc correcte et peut être utilisée comme alternative au domaine de résistance.**

Références et littérature

- [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
ELEMENTS DE CONSTRUCTIONS METALLIQUE
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
ENV 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
ENV 1991-2-2:1995

- [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 und 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 18 800 Teil 1 bis Teil 3 (11.90)
Werner-Verlag, Düsseldorf 1991
- [13] E. Kahlmeyer
Stahlbau nach DIN 18 800 (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
- [26] Handleiding moduul 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.