

FORMATION AVANCÉE
Aluminium

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

© Copyright 2022 SCIA nv. Tous les droits sont réservés.

Sommaire

Sommaire	3
Chapitre 1: Introduction	5
Chapitre 2: Matériaux et combinaisons.....	7
2.1 Nuances d'aluminium	7
2.2 Combinaisons.....	9
Chapitre 3: Analyse de structure.....	13
3.1. Analyse globale.....	13
3.2. Imperfection global de portique φ	14
3.3. Imperfection initiale en arc e_0	15
Chapitre 4: Forme initiale, classification et forme réduite	21
4.1. Forme initiale.....	21
4.2. Classification.....	23
4.3. Forme réduite	25
4.4. Exemple	32
4.5. Section	42
Chapitre 5: Contrôle ELS	43
5.1. Déplacement des nœuds	43
5.2. Déformations relatives	43
Chapitre 6: Données additionnelles.....	47
6.1. Configuration.....	47
6.2. Donnée de l'élément aluminium	49
6.3. Longueurs de référence et groupes de flambement.....	50
6.4. Donnée des éléments	54
Chapitre 7: Contrôles ELU	59
7.1. Elancement aluminium.....	59
7.2. Contrôle de section.....	59
7.3. Contrôle en stabilité.....	68
Chapitre 8: Références	91

Chapitre 1: Introduction

Les règles de l'EN 1999-1-1 sont expliquées et illustrées.



=> EN 1999-1-1 :2007

Davantage de références aux articles appliquées sont disponibles en [1].

SCIA Engineer Aluminum Code check
 Theoretical Background
 Release : 18.0
 Revision : 08/2018

Les exemples suivants sont disponibles :

Projet	Sujet
wsa_001.esa	Analyse globale
wsa_001a.esa	Déplacement aux nœuds
wsa_001b.esa	Déplacements relatifs
wsa_002.esa	Section z – classification
wsa_003.esa	Section à paroi mince
wsa_004.esa	Cisaillement
wsa_005.esa	Flexion composée – soudures transversales
wsa_006.esa	Flambement flexionnel
wsa_008.esa	Déversement
wsa_009a.esa	Stabilité composée – xs 1
wsa_009b.esa	Stabilité composée – xs 2
wsa_010.esa	Voilement - raidisseurs

Chapitre 2: Matériaux et combinaisons

2.1 Nuances d'aluminium

Les valeurs caractéristiques des propriétés du matériau sont basées sur le tableau 3.2a pour les alliages d'aluminium de type tôle, bande et plaque, et sur le tableau 3.2b pour les alliages d'aluminium de profilé de type extrudé, tube extrudé, tige/barre extrudée et tube étiré.

Alloy EN-AW	Temper ¹⁾	Thick-ness ¹⁾ mm	f_0 ¹⁾	f_u	A_{50} ¹⁾⁶⁾	$f_{0,HAZ}$ ²⁾	$f_{u,HAZ}$ ²⁾	HAZ-factor ²⁾		BC ⁴⁾	n_p ^{1) 5)}
			N/mm ²			%	N/mm ²		$\rho_{0,HAZ}$ ¹⁾		
3004	H14 H24/H34	≤ 6 3	180 170	220	113	75	155	0,42 0,44	0,70	B	23 18
	H16 H26/H36	≤ 4 3	200 190	240	113			0,38 0,39	0,65	B	25 20
3005	H14 H24	≤ 6 3	150 130	170	114	56	115	0,37 0,43	0,68	B	38 18
	H16 H26	≤ 4 3	175 160	195	113			0,32 0,35	0,59	B	43 24
3103	H14 H24	≤ 2,5 12,5	120 110	140	214	44	90	0,37 0,40	0,64	B	31 20
	H16 H26	≤ 4	145 135	160	112			0,30 0,33	0,56	B	48 28
5005/ 5005A	O/H111	≤ 50	35	100	15	35	100	1	1	B	5
	H12 H22/H32	≤ 12,5	95 80	125	214	44	100	0,46 0,55	0,80	B	18 11
	H14 H24/H34	≤ 12,5	120 110	145	213			0,37 0,40	0,69	B	25 17
5052	H12 H22/H32	≤ 40	160 130	210	415	80	170	0,50 0,62	0,81	B	17 10
	H14 H24/H34	≤ 25	180 150	230	314			0,44 0,53	0,74	B	19 11
5049	O / H111	≤ 100	80	190	12	80	190	1	1	B	6
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	316	100	190	0,53 0,63	0,79	B	20 12
5454	O/H111	≤ 80	85	215	12	85	215	1	1	B	5
	H14 H24/H34	≤ 25	220 200	270	214	105	215	0,48 0,53	0,80	B	22 15
5754	O/H111	≤ 100	80	190	12	80	190	1	1	B	6
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	316	100	190	0,53 0,63	0,79	B	20 12
5083	O/H111	≤ 50	125	275	11	125	275	1	1	B	6
		50 < r ≤ 80	115	270	14 ³⁾	115	270				
	H12 H22/H32	≤ 40	250 215	305	315	155	275	0,62 0,72	0,90	B	22 14
H14 H24/H34	≤ 25	280 250	340	214	0,55 0,62			0,81	A	22 14	
6061	T4 / T451	≤ 12,5	110	205	12	95	150	0,86	0,73	B	8
	T6 / T651	≤ 12,5	240	290	6	115	175	0,48	0,60	A	23
	T651	12,5 < r ≤ 80	240	290	6 ³⁾						
6082	T4 / T451	≤ 12,5	110	205	12	100	160	0,91	0,78	B	8
	T61/T6151	≤ 12,5	205	280	10	125	185	0,61	0,66	A	15
	T6151	12,5 < r ≤ 100	200	275	12 ³⁾			0,63	0,67	A	14
	T6/T651	≤ 6	260	310	6			0,48	0,60	A	25
		6 < r ≤ 12,5	255	300	9			0,49	0,62	A	27
T651	12,5 < r ≤ 100	240	295	7 ³⁾	0,52			0,63	A	21	
7020	T6	≤ 12,5	280	350	7	205	280	0,73	0,80	A	19
	T651	≤ 40		9 ³⁾							
8011A	H14 H24	≤ 12,5	110 100	125	213	37	85	0,34 0,37	0,68	B	37 22
	H16 H26	≤ 4	130 120	145	112			0,28 0,31	0,59		

1) If two (three) tempers are specified in one line, tempers separated by " | " have different technological values but separated by " / " have same values. (The tempers show differences for f_0 , A and n_p).

2) The HAZ-values are valid for MIG welding and thickness up to 15mm. For TIG welding strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A) up to 6 mm the same values apply, but for TIG welding precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) and thickness up to 6 mm the HAZ values have to be multiplied by a factor 0,8 and so the ρ -factors. For higher thickness – unless other data are available – the HAZ values and ρ -factors have to be further reduced by a factor 0,8 for the precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) and by a factor 0,9 for the strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A). These reductions do not apply in temper O.

3) Based on A ($= A_{5,65\sqrt{A_0}}$), not A_{50} .

4) BC = buckling class, see 6.1.4.4, 6.1.5 and 6.3.1.

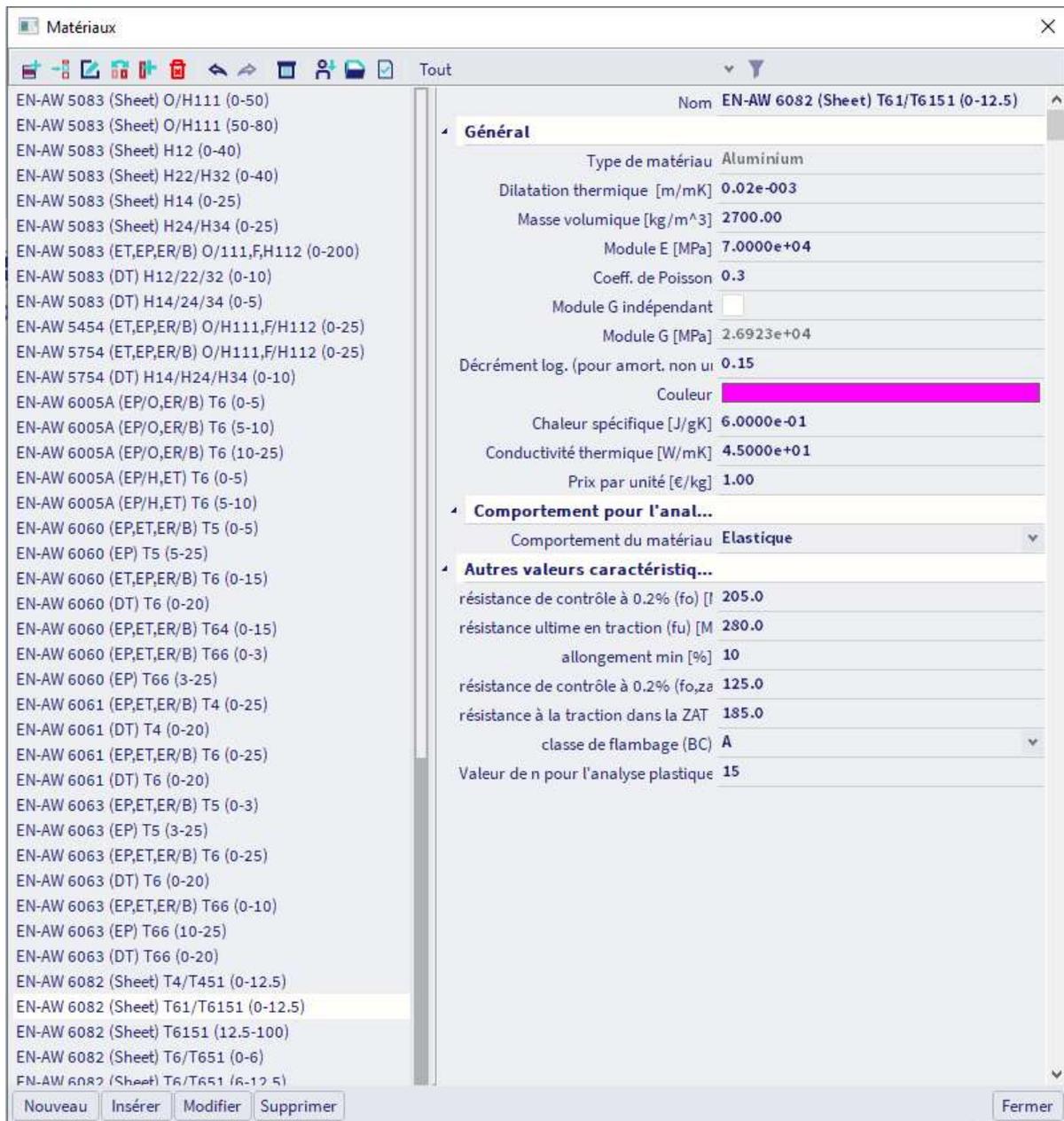
5) n-value in Ramberg-Osgood expression for plastic analysis. It applies only in connection with the listed f_0 -value.

6) The minimum elongation values indicated do not apply across the whole range of thickness given, but mostly to the thinner materials. In detail see EN 485-2.

Table 3.2b - Characteristic values of 0,2% proof strength f_0 and ultimate tensile strength f_u (unwelded and for HAZ), min elongation A , reduction factors $\rho_{0,HAZ}$ and $\rho_{u,HAZ}$ in HAZ, buckling class and exponent n_p for wrought aluminium alloys - Extruded profiles, extruded tube, extruded rod/bar and drawn tube

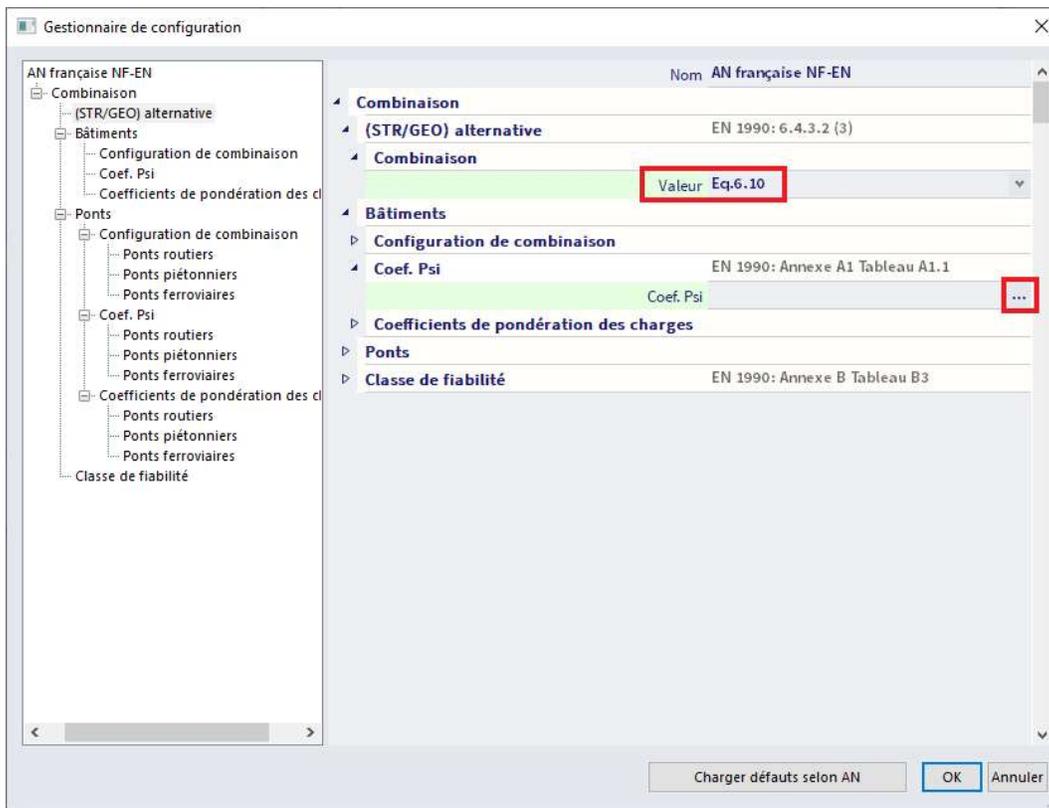
Alloy EN-AW	Product form	Temper	Thick-ness t mm 1) 3)	f_0 1)	f_u 1)	A 5) 2)	$f_{0,HAZ}$ 4)	$f_{u,HAZ}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	n_p 7)
				N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	$\rho_{0,HAZ}$	$\rho_{u,HAZ}$			
5083	ET, EP, ER/B	O / H111, E, H112	$t \leq 200$	110	270	12	110	270	1	1	B	5
	DT	H12/22/32	$t \leq 10$	200	280	6	135	270	0,68	0,96	B	14
		H14/24/34	$t \leq 5$	235	300	4			0,57	0,90	A	18
6060	EP, ET, ER/B	T5	$t \leq 5$	120	160	8	50	80	0,42	0,50	B	17
	EP		$5 < t \leq 25$	100	140	8			0,50	0,57	B	14
	ET, EP, ER/B	T6	$t \leq 15$	140	170	8	60	100	0,43	0,59	A	24
	DT		$t \leq 20$	160	215	12			0,38	0,47	A	16
	EP, ET, ER/B	T64	$t \leq 15$	120	180	12	60	100	0,50	0,56	A	12
	EP, ET, ER/B	T66	$t \leq 3$	160	215	8	65	110	0,41	0,51	A	16
EP	$3 < t \leq 25$		150	195	8	0,43			0,56	A	18	
6061	EP, ET, ER/B, DT	T4	$t < 25$	110	180	50	95	150	0,86	0,83	B	8
	EP, ET, ER/B, DT	T6	$t \leq 20$	240	260	8	115	175	0,48	0,67	A	55
6063	EP, ET, ER/B	T5	$t \leq 3$	130	175	8	60	100	0,46	0,57	B	16
	EP		$3 < t \leq 25$	110	160	7			0,55	0,63	B	13
	EP, ET, ER/B	T6	$t \leq 25$	160	195	8	65	110	0,41	0,56	A	24
	DT		$t \leq 20$	190	220	10			0,34	0,50	A	31
	EP, ET, ER/B	T66	$t \leq 10$	200	245	8	75	130	0,38	0,53	A	22
	EP		$10 < t \leq 25$	180	225	8			0,42	0,58	A	21
DT	$t \leq 20$		195	230	10	0,38			0,57	A	28	
6005A	EP/O, ER/B	T6	$t \leq 5$	225	270	8	115	165	0,51	0,61	A	25
			$5 < t \leq 10$	215	260	8			0,53	0,63	A	24
			$10 < t \leq 25$	200	250	8			0,58	0,66	A	20
	EP/H, ET	T6	$t \leq 5$	215	255	8	115	165	0,53	0,65	A	26
$5 < t \leq 10$	200		250	8	0,58	0,66			A	20		
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	8	95	160	0,48	0,64	A	20
6082	EP, ET, ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	14	100	160	0,91	0,78	B	8
	EP/O, EP/H	T5	$t \leq 5$	230	270	8	125	185	0,54	0,69	B	28
	EP/O, EP/H		$5 < t \leq 15$	250	290	8			0,50	0,64	A	32
	ET	T6	$t \leq 20$	260	310	10	125	185	0,48	0,60	A	25
			$20 < t \leq 150$	250	295	8			0,50	0,63	A	27
	ER/B	T6	$t \leq 5$	260	310	8	125	185	0,48	0,60	A	25
$5 < t \leq 20$			255	310	8	0,49			0,60	A	22	
DT	T6	$t \leq 20$	240	310	10	125	185	0,52	0,60	A	17	
$5 < t \leq 20$		240	310	10	0,52			0,60	A	17		
7020	EP, ET, ER/B	T6	$t \leq 15$	290	350	10	205	280	0,71	0,80	A	23
	EP, ET, ER/B	T6	$15 < t < 40$	275	350	10			0,75	0,80	A	19
	DT	T6	$t \leq 20$	280	350	10			0,73	0,80	A	18

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



2.2 Combinaisons

Dans SCIA Engineer, les combinaisons ELU ET ELS peuvent être définies selon la norme EC-EN1990. Dans cette configuration, les coefficients partiels de sécurité et les coefficients psi peuvent être définis.



Conformément l'EC-EN 1990 :2002, les combinaisons ELU peuvent être exprimées de deux manières :

- En utilisant l'équation 6.10

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

- En utilisant les équations 6.10a et 6.10b

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

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

Les deux méthodes ont été implémentées dans SCIA Engineer. La méthode choisie doit être spécifiée dans l'annexe nationale.

Exemple :

Considérons une structure soumise à une charge permanente défavorable, une charge d'exploitation de catégorie A et une charge de vent.

Pour des actions permanentes défavorables : $\gamma_G = 1,35$

Pour des actions variables dominantes : $\gamma_{Q,1} = 1,50$

Pour des actions variables d'accompagnement : $\gamma_{Q,i} = 1,50$

ψ_0 pour une charge de vent est égal à 0.

ψ_0 pour une charge d'exploitation de catégorie A est égal à 0,7.

Coefficient de réduction pour les actions permanentes défavorables : $\xi = 0,85$

En utilisant l'équation 6,10 :

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

En utilisant les équations 6,10a et 6,10b :

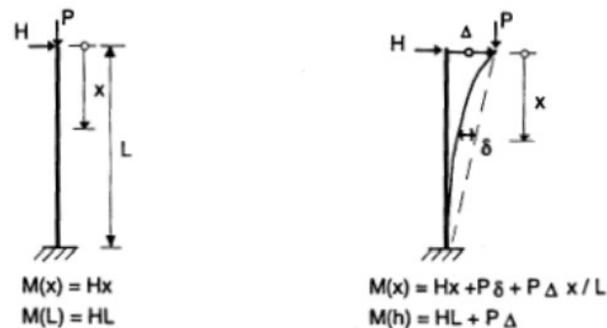
- ⇒ Combinaison 1 : 1,35 Permanent + 1,05 Exploitation + 0,90 Vent
 - ⇒ Combinaison 2 : 1,15 Permanent + 1,50 Exploitation + 0,90 Vent
 - ⇒ Combinaison 3 : 1,15 Permanent + 1,05 Exploitation + 1,50 Vent
-

Chapitre 3: Analyse de structure

3.1. Analyse globale

L'analyse globale a pour but de déterminer la distribution des efforts internes et des moments et des déplacements correspondants dans 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 élastiques des méthodes plastiques. L'analyse plastique est soumise à quelques restrictions. Une autre distinction importante se trouve entre les méthodes, qui tiennent compte, ou qui négligent, les effets de la configuration déformée de la structure. Cela fait référence respectivement à la théorie du second ordre et à celle du premier ordre. La théorie du second ordre peut être appliquée dans tous les cas, tandis que la théorie du premier ordre n'est utilisée que lorsque les effets des déplacements sur le comportement de la structure sont négligeables.



Théorie du
premier ordre

Théorie du
second ordre

Conformément à l'EC-EN 1990, l'analyse au premier ordre peut être effectuée, si l'augmentation des efforts internes et des moments ou tout autre changement du comportement de la structure générés par les déformations, peut être négligé. Cette condition est supposée remplie, si le critère suivant est satisfait :

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

Avec :

- α_{cr} coefficient par lequel la charge de calcul doit être augmenté pour entraîner une instabilité élastique dans le mode global.
- F_{Ed} charge de calcul sur la structure
- F_{cr} charge de flambement critique élastique pour l'instabilité globale, basée sur la rigidité élastique initiale.

3.2. Imperfection global de portique φ

L'imperfection globale de portique φ est donnée par l'article 5.3.2(3) (Réf [1]) :

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

Avec :

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$$

Mais :

$$\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

Et :

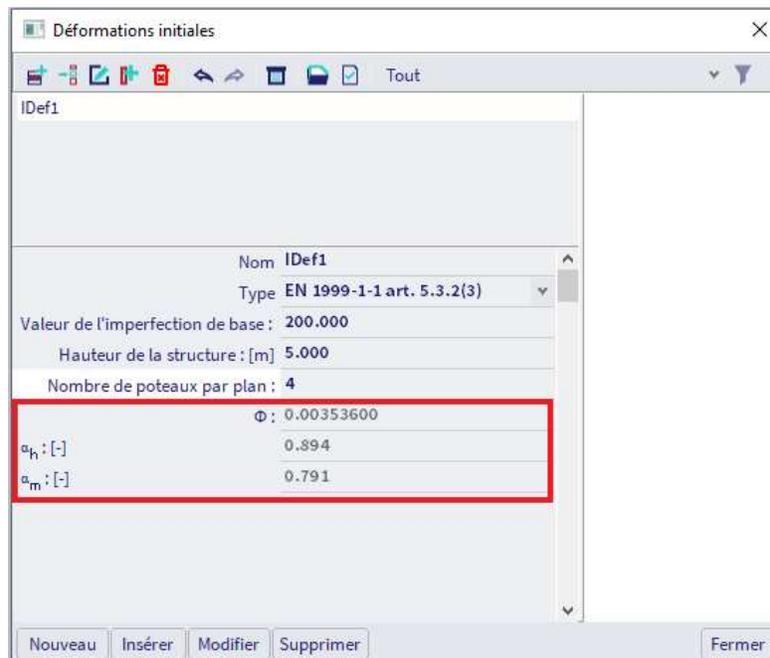
$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

Et aussi :

h hauteur de la structure en mètres.

m nombre de poteaux dans une rangée, en ne tenant compte que de ceux qui reprennent un effort normal N_{Ed} pas inférieur à 50% de la valeur moyenne de la charge verticale par poteau dans le plan considéré.

Cette imperfection peut être calculée automatiquement dans SCIA Engineer :



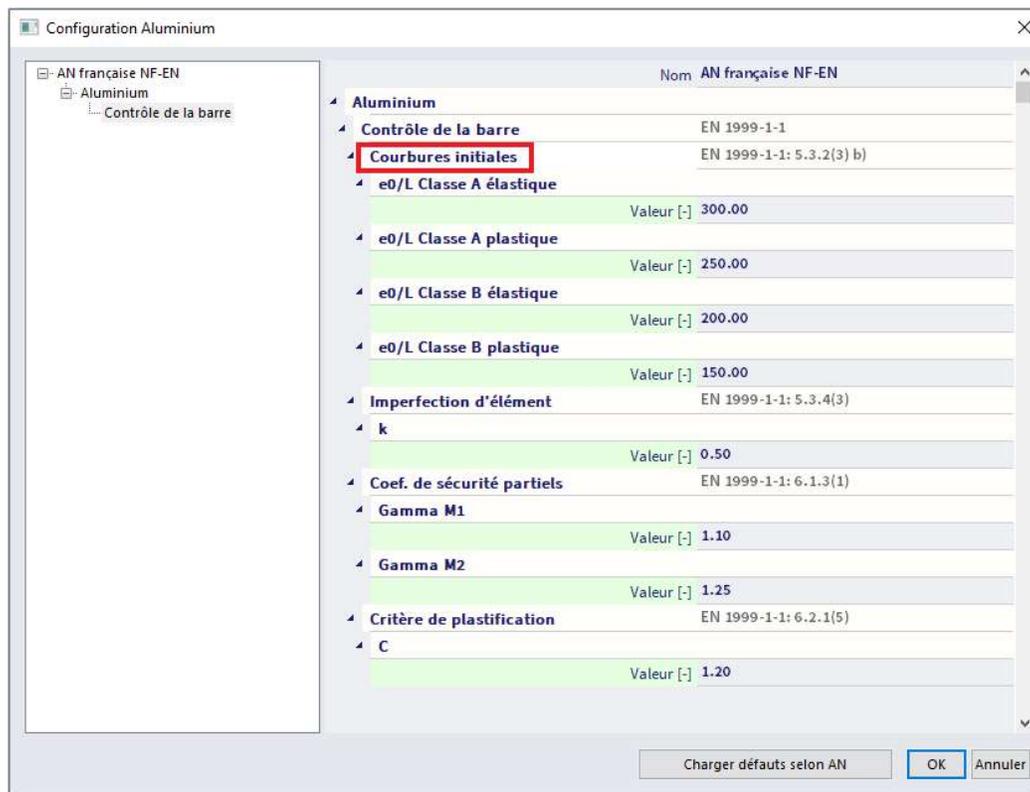
3.3. Imperfection initiale en arc e_0

La valeur e_0/L peut être choisie dans l'annexe nationale. Les valeurs recommandées sont données conformément au tableau 5.1 Réf.[1]. L'imperfection en arc 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} .

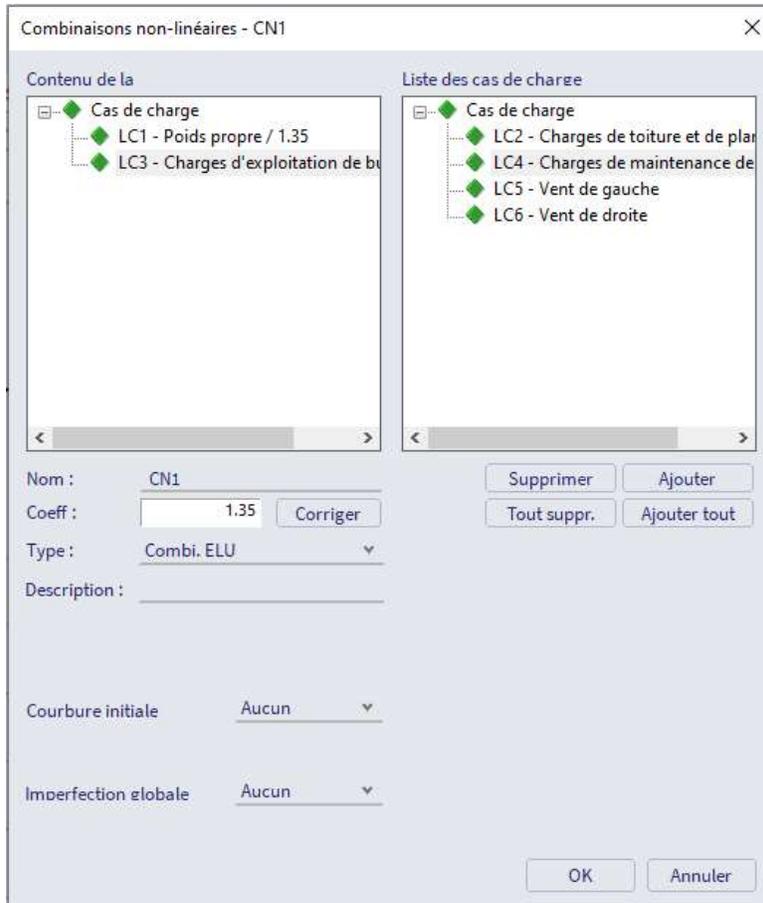
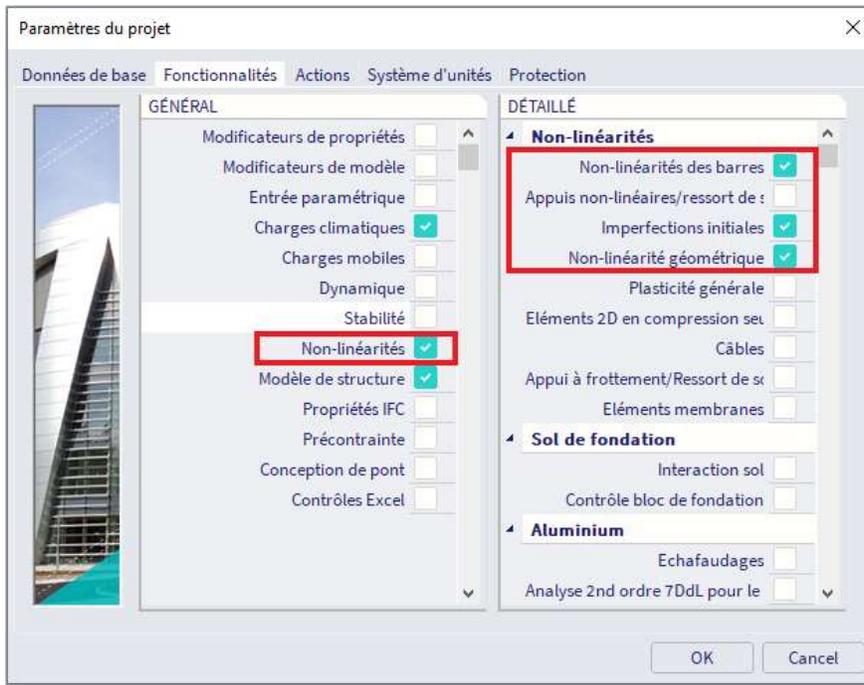
Buckling class acc. to Table 3.2	elastic analysis	plastic analysis
	e_0/L	e_0/L
A	1/300	1/250
B	1/200	1/150

L représente la longueur de l'élément.

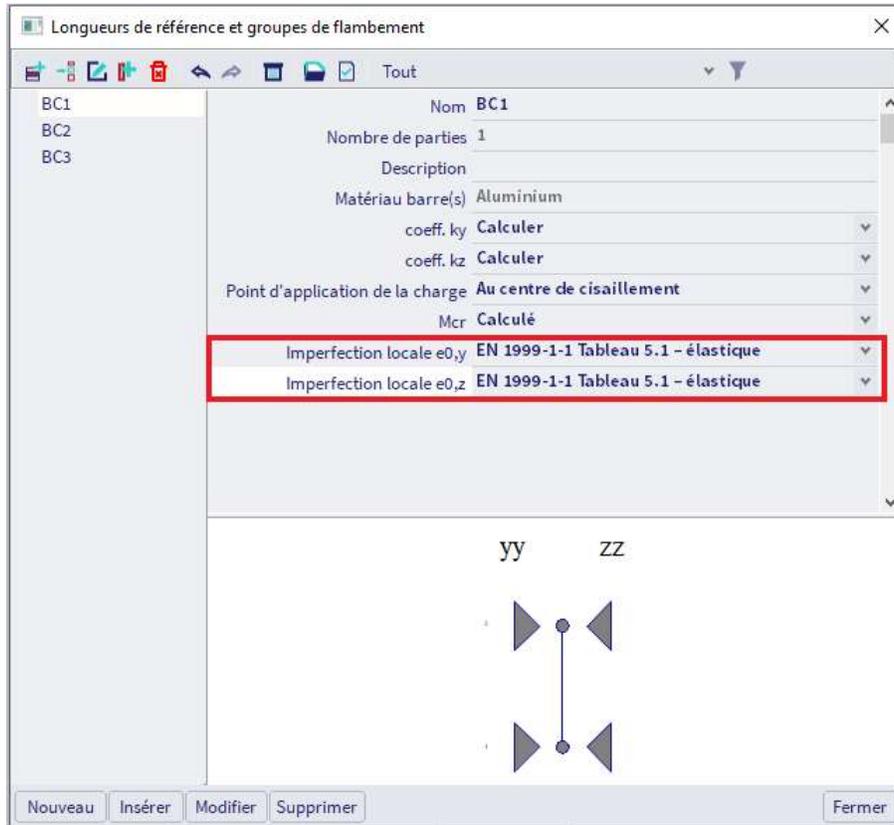
SCIA Engineer peut calculer automatiquement l'imperfection conformément à la norme pour tous les éléments demandés ou bien l'utilisateur peut lui-même saisir une valeurs pour e_0 . Cela peut se faire dans le menu Fichier / Paramètres du projet. Dans le premier onglet « Données de base », cliquer sur l'annexe nationale et EN 1999 : conception des structures en aluminium, puis sur les trois points en face de EN 1999-1-1 (Règles générales pour les structures) :



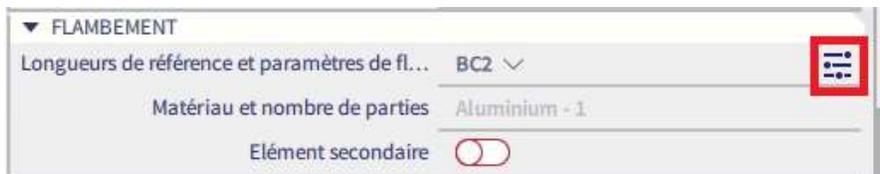
Pour pouvoir saisir les imperfections globales et locales dans SCIA Engineer, l'utilisateur doit sélectionner les fonctionnalités « Non-linéarités », « Non-linéarité des barres », « Imperfections initiales » et « Non-linéarité géométrique » dans les paramètres du projet. Certaines de ces fonctionnalités sont activées par défaut dans les nouveaux projets. Seulement après cela, la saisie d'une fonction non-linéaire sera possible.



En sélectionnant « Groupes de flambement » depuis le menu « Bibliothèques » / « Structure et analyse », l'utilisateur peut ajuster la saisie des imperfections en arc. Cela s'appliquera à tous les éléments qui appartiennent à ce groupe :

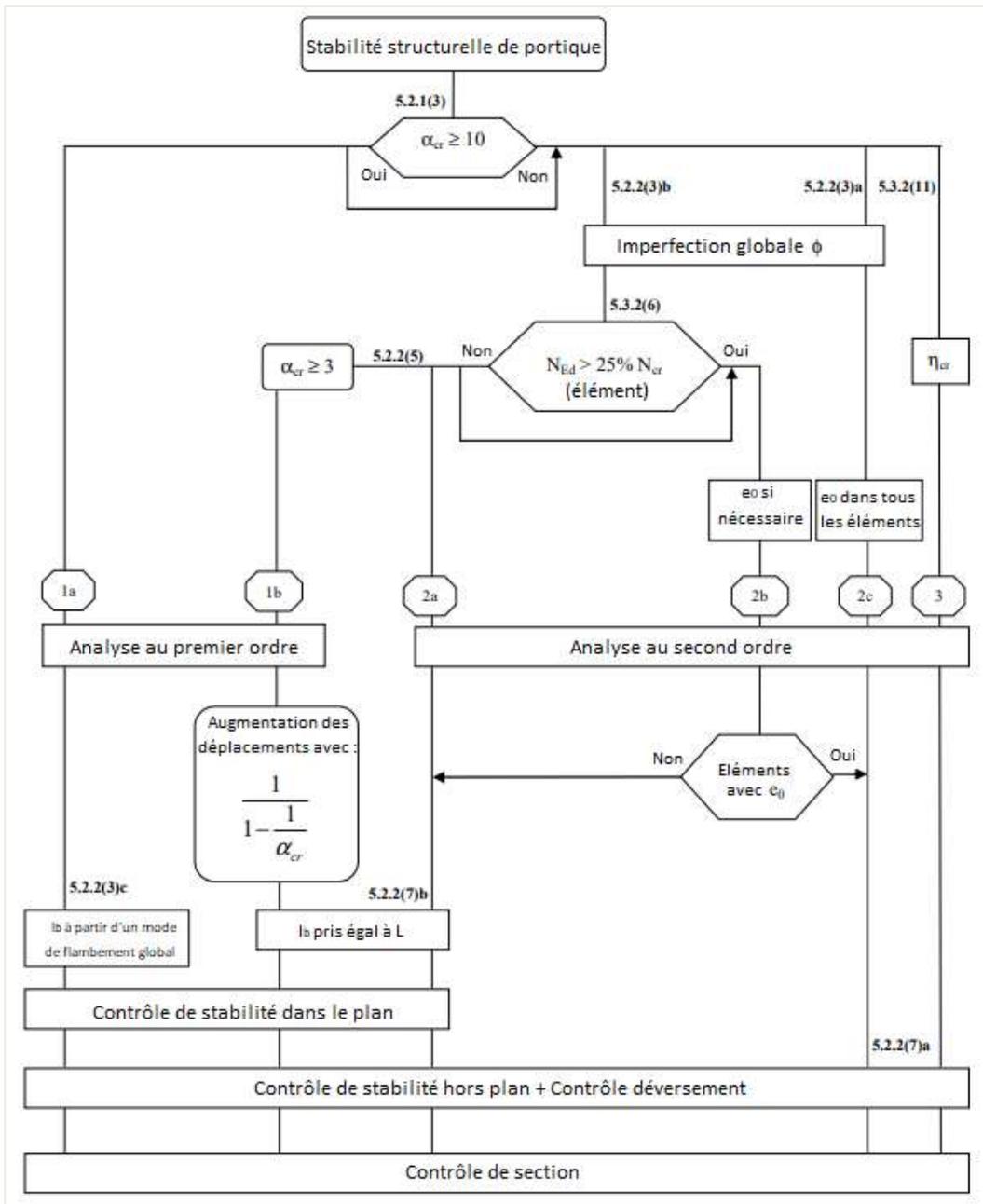


Il est possible d'effectuer la même manipulation pour chaque élément en le sélectionnant et en cliquant sur la propriété « Longueurs de référence et paramètres de flambement » :



La courbe de flambement utilisée pour le calcul de l'imperfection est la courbe indiquée dans les propriétés du matériau.

La procédure générale pour l'EC-EN 1999 est présentée dans le diagramme suivant :



Avec :

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

Le chemin 1a fait référence à la « Méthode des Poteaux Equivalents ».

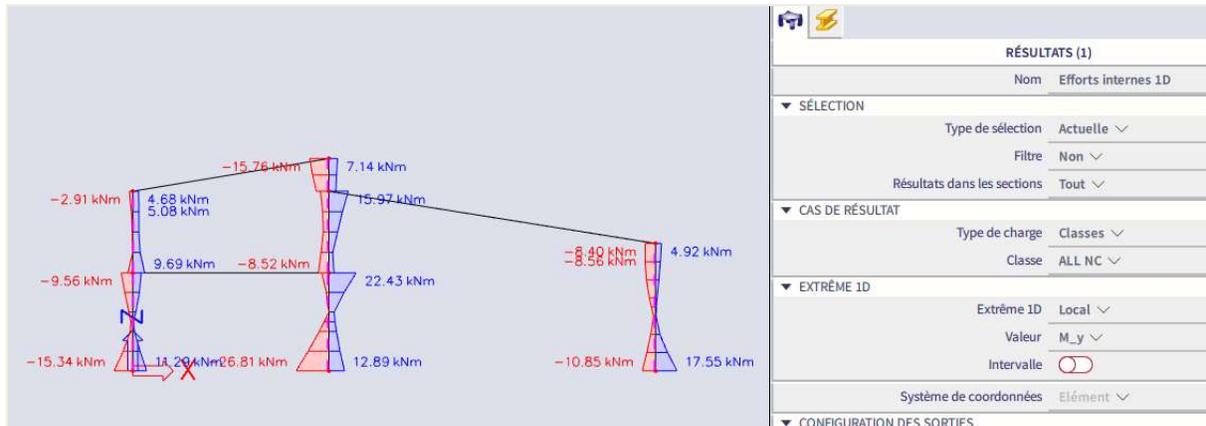
Dans les chemins 1b et 2a, « l_b peut être pris égal à L ». Cela est conforme à l'EC-EN, l'utilisateur n'a alors pas besoin de calcul les coefficients de flambement (sont égaux à 1).

Le chemin 2 fait référence à la « Méthode des Déplacements Equivalents ». Dans la suite de l'analyse, un coefficient de flambement inférieur à 1 sera justifié.

Exemple : wsa_001a.esa

La méthode 2c conformément à l'EC-EN est utilisée :

- combinaisons ELU
- combinaisons non-linéaires ELU avec :
 - o imperfection globale : selon la norme
 - o imperfection en arc : selon les données de flambement
- calcul non-linéaire en utilisant Timoshenko



L'imperfection en arc peut être visualisée dans les outils du processus, en cliquant sur le poste de travail « Aluminium », puis « Elancement ».

Données d'élancement

Calcul linéaire

Élément	Nom prof.	Partie	Nds dépl. y	L _y	k _y	l _y	Lam y	e _{0,y}	l _{yz}	I DEV
				[m]	[-]	[m]	[-]	[mm]		
			Nds dépl. z	L _z	k _z	l _z	Lam z	e _{0,z}		
				[m]	[-]	[m]	[-]	[mm]		
B1	column A	1	Oui	3.000	1.13	3.386	56.37	10.0	5.500	5.500
			Non	5.500	1.00	5.500	196.13	18.3		
B1	column A	2	Oui	2.500	1.45	3.615	60.18	8.3	5.500	5.500
			Non	5.500	1.00	5.500	196.13	18.3		
B2	column B	1	Oui	3.000	1.27	3.797	50.48	10.0	6.500	6.500
			Non	6.500	1.00	6.500	213.74	21.7		
B2	column B	2	Oui	2.500	1.84	4.598	61.13	8.3	6.500	6.500
			Non	6.500	1.00	6.500	213.74	21.7		
B2	column B	3	Oui	1.000	2.03	2.033	27.03	3.3	6.500	6.500
			Non	6.500	1.00	6.500	213.74	21.7		
B3	column C	1	Oui	3.900	1.02	3.975	66.18	13.0	3.900	3.900
			Non	3.900	1.00	3.900	139.07	13.0		

Conformément au tableau 3.2 (Réf.[1]), la courbe de flambement selon le matériau EN-AW 6082 (Sheet) T6/T651 (0-6) est A.

Poteau B1 : L₁ = 2500mm => e₀ = 1/300 * 2500 = 8,3mm
 Poteau B1 : L₂ = 3000mm => e₀ = 1/300 * 3000 = 10,0mm

Poteau B2 : L₁ = 3000mm => e₀ = 1/300 * 3000 = 10,0mm
 Poteau B2 : L₂ = 2500mm => e₀ = 1/300 * 2500 = 8,3mm

Poteau B2 : $L_3 = 1000\text{mm} \Rightarrow e_0 = 1/300 * 1000 = 3,3\text{mm}$

Poteau B3 : $L_1 = 3900\text{mm} \Rightarrow e_0 = 1/300 * 3900 = 13,0\text{mm}$

Poteau B3 : $L_2 = 3900\text{mm} \Rightarrow e_0 = 1/300 * 3900 = 13,0\text{mm}$

Chapitre 4: Forme initiale, classification et forme réduite

4.1. Forme initiale

Pour une section avec un matériau « aluminium », la forme initiale peut être définie. Pour une section générale, la « forme en paroi mince » doit être utilisée pour pouvoir définir la forme initiale.

Les types des différentes parties sont utilisés pour déterminer la classification et les coefficients de réduction.

Les parties de la section en paroi mince peut avoir les types suivants :

F	Partie fixe – aucune réduction n'est nécessaire
I	Partie interne de la section
SO	Bord symétrique
UO	Bord non-symétrique

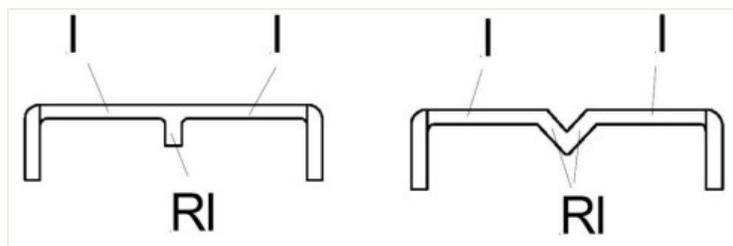
Une partie de la section peut être prise en compte en renfort :

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

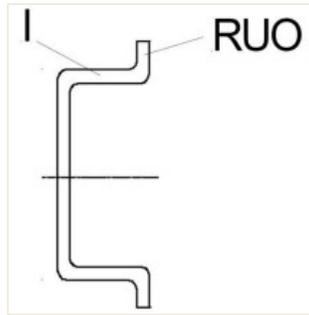
Dans le cas où une partie est spécifiée comme renfort, un identifiant ID de renfort peut être saisi. Les parties ayant le même identifiant (ID) de renfort sont considérées comme un seul renfort.

Les conditions suivantes s'appliquent pour l'utilisation de renfort :

- RI : il s'agit de types plaque I des deux côtés d'un renfort RI :

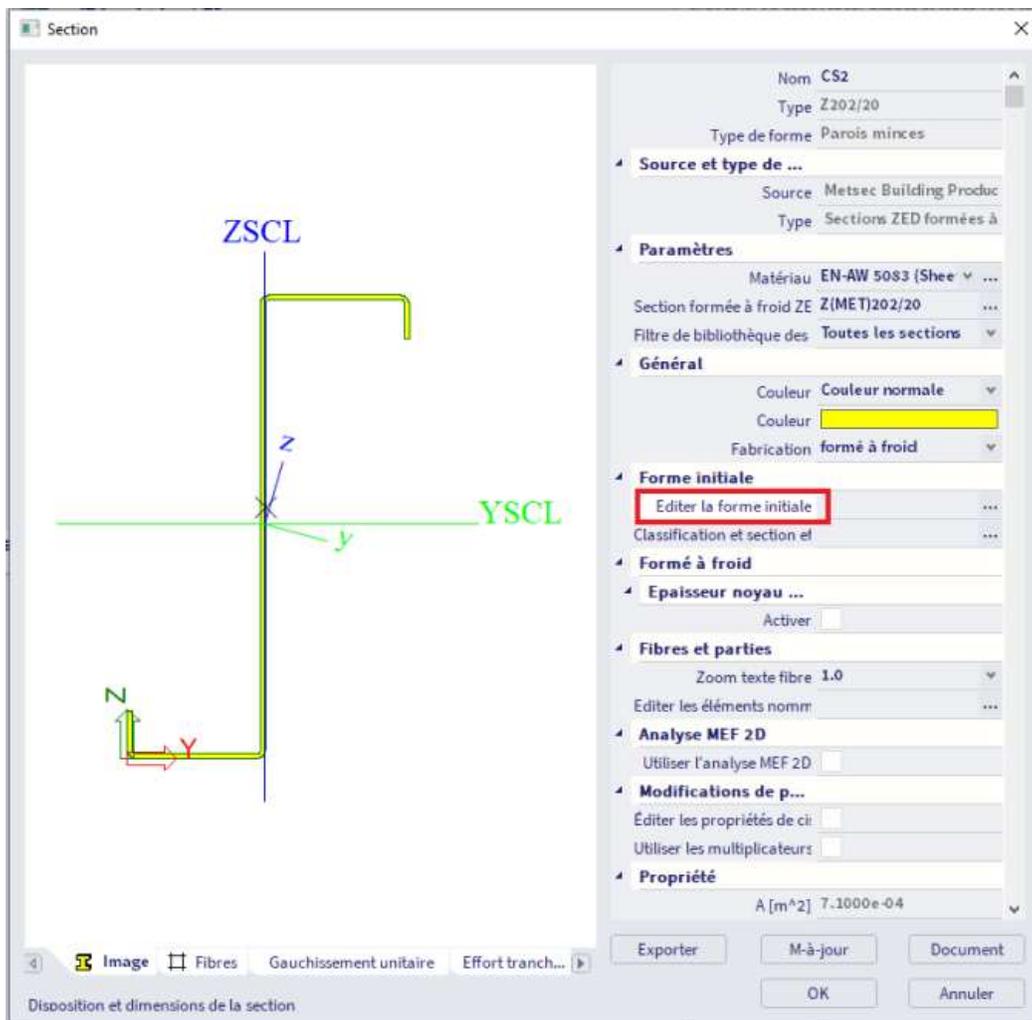


- RUO : il s'agit d'un renfort connecté à seulement une plaque de type I :

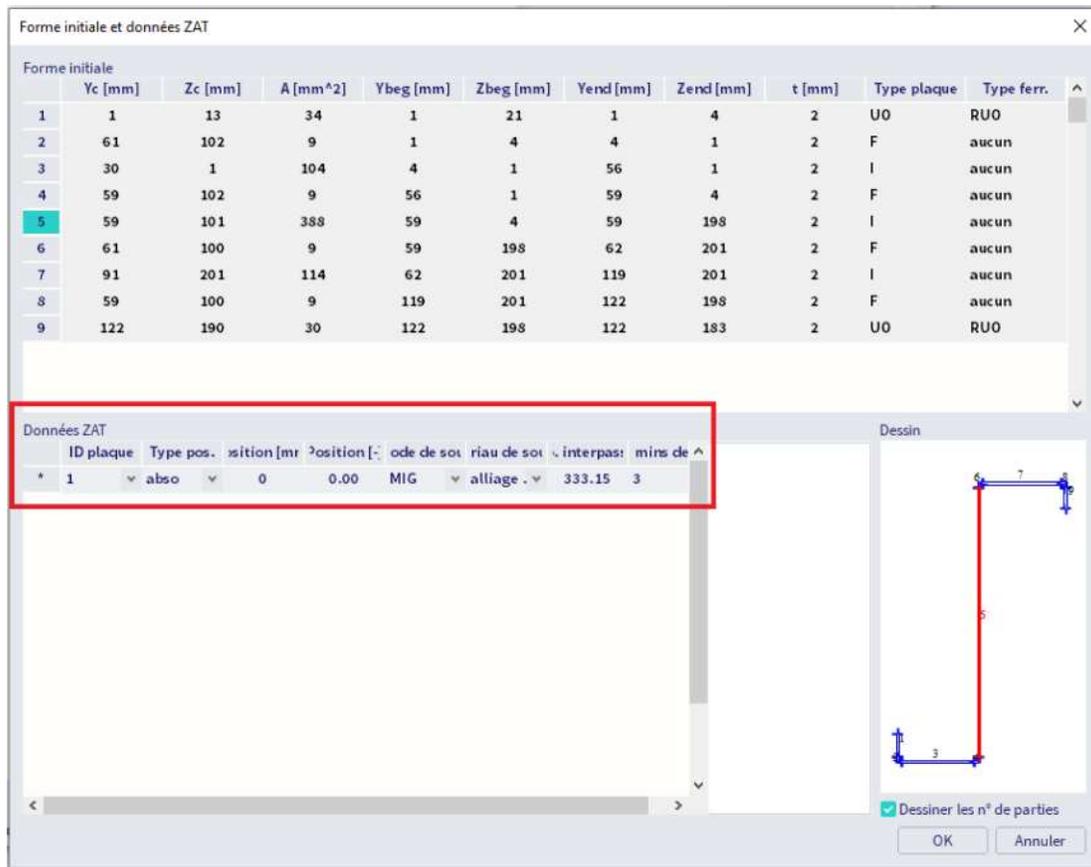


Pour les sections standards, les types par défaut et les renforts peuvent se trouver dans la référence (Réf.[1]). Pour les sections non standards, l'utilisateur doit évaluer les différentes parties de la section.

La forme initiale peut être saisie dans le menu Bibliothèques / Sections, cliquer sur « Modifier » pour modifier la section. L'utilisateur peut alors cliquer sur les trois points en face de « Editer la forme initiale » :



Dans la fenêtre qui s'ouvre, les soudures peuvent également être saisies (ce sont les données ZAT, Zone Affectée Thermiquement / par la chaleur, ou en anglais HAZ, Heath Affected Zone) :



Les paramètres des soudures (données ZAT) sont :

- L'identifiant ID de la plaque
- La position
- La méthode de la soudure : MIG ou TIG
- Le matériau de la soudure : 5xxx et 6xxx ou 7xxx
- La température de la soudure
- Le nombre de chemins thermiques

Ces paramètres seront discutés dans un autre chapitre.

4.2. Classification

Quatre classes de section sont définies, comme suit (Ref.[1]) :

- Les sections de classe 1 sont celles qui peuvent former une rotule plastique avec la capacité de rotation nécessaire pour une analyse plastique sans réduction de la résistance.
- Les sections de classe 2 sont celles qui peuvent développer leur résistance de moment plastique, mais qui ont une capacité de rotation limitée à cause du voilement / flambement local.

- Les sections de classe 3 sont celles dont la contrainte calculée dans la fibre comprimée extrême de l'élément aluminium peut atteindre sa résistance élastique, mais le voilement / flambement local est susceptible d'empêcher le développement de la résistance totale du moment plastique.
- Les sections de classe 4 sont celles dont le voilement / flambement local se produit avant d'atteindre la contrainte élastique dans une ou plusieurs zones de la section.

La classification des éléments en flexion composée et efforts normaux, est faite pour les composants de charges séparément. Aucune classification n'est faite pour l'état de contraintes combinées.

La classification est donc faite pour N , M_y et M_z séparément. Comme la classification est indépendante de l'intensité des efforts réels dans la section, la classification est toujours effectuée pour chaque composant / partie.

En prenant en compte le signe des composants de l'effort et les coefficients de réduction ZAT, cela conduit aux composants d'efforts suivants pour lesquels la classification est faite :

Effort de compression	N-
Effort de traction	N+ avec $\rho_{0,ZAT}$
Effort de traction	N+ avec $\rho_{u,ZAT}$
Flexion selon l'axe yy	My-
Flexion selon l'axe yy	My+
Flexion selon l'axe zz	Mz-
Flexion selon l'axe zz	Mz+

Pour chacun de ces composants, la forme réduite est déterminée et les propriétés de la section effective sont calculées.

La procédure suivante est appliquée pour déterminer la classification des différentes parties :

- Étape 1 : calcul de contraintes.
Pour les composants d'effort donné (N , M_y , M_z), la contrainte normale est calculée sur la partie plaque rectangulaire pour la forme initiale (géométrique).
- Étape 2 : détermination du gradient de contrainte sur la partie plaque.
- Étape 3 : calcul de l'élanement.
En fonction des contraintes et du type de plaque, le paramètre d'élanement β est calculé. Les formules utilisées peuvent se trouver dans la référence (Réf.[1]).

Si $\beta \leq \beta_1$ => classe 1
 Si $\beta_1 < \beta \leq \beta_2$ => classe 2
 Si $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$ => classe 3
 Si $\beta_3 < \beta$ => classe 4

Les valeurs de β_1 , β_2 et de β_3 sont conforme au tableau 6.2 de (Réf.[1]) :

Material classification according to Table 3.2	Internal part			Outstand part		
	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε
Class A, without welds	11	16	22	3	4,5	6
Class A, with welds	9	13	18	2,5	4	5
Class B, without welds	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Class B, with welds	10	13,5	15	3	3,5	4
$\varepsilon = \sqrt{250/f_0}$, f_0 in N/mm ²						

4.3. Forme réduite

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

La forme réduite est utilisée pour le contrôle aluminium selon la norme et est basée sur trois coefficients de réduction :

- ρ_c : coefficient de réduction du au « flambement local » d'une partie de la section. Pour une section dont la partie est en traction ou avec une classification différente de la classe 4, le coefficient de réduction ρ_c est pris égal à 1.
- χ (kappa) : coefficient de réduction du au « flambement de distorsion ».
- ρ_{ZAT} : coefficient de réduction du aux effets ZAT.

Coefficient de réduction ρ_c pour le voilement / flambement local

Dans le cas où une partie de section est de classe 4 (mince), le coefficient de réduction ρ_c pour le voilement / flambement local est calculé selon l'article 6.1.5 (Réf.[1]) :

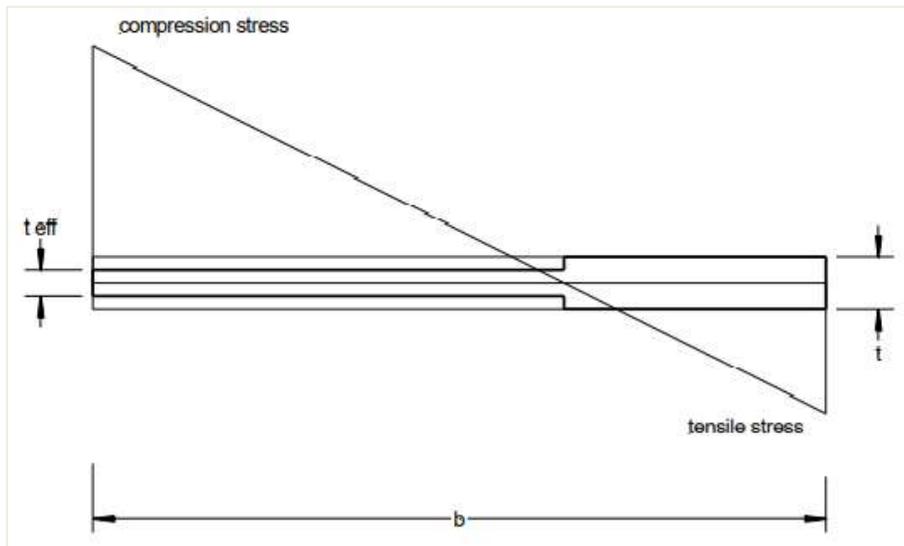
$$\rho_c = \frac{c_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{c_2}{(\beta/\varepsilon)^2}$$

Material classification according to Table 3.2	Internal part		Outstand part	
	C_1	C_2	C_1	C_2
Class A, without welds	32	220	10	24
Class A, with welds	29	198	9	20
Class B, without welds	29	198	9	20
Class B, with welds	25	150	8	16

Tableau 6.3 – Constantes C_1 et C_2 dans les expressions pour ρ_c

Pour une partie de section en traction ou avec une classe différente de 4, le coefficient de réduction ρ_c est pris égal à 1.

Dans le cas d'une partie de section soumise à des contraintes de compression et de traction, le coefficient de réduction ρ_c est appliqué uniquement à la zone comprimée, comme illustré dans la figure ci-dessous.



Coefficient de réduction χ (κ) pour le flambement de distorsion

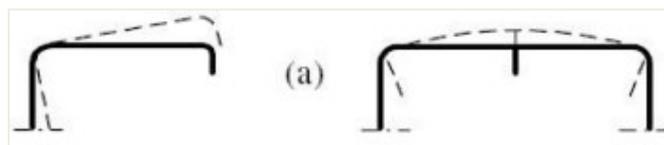
Dans SCIA Engineer, une procédure générale est utilisée conformément à la référence Réf.[2]. Le calcul des éléments raidis est basé sur l'hypothèse que le raidisseur lui-même agit comme une poutre sur appuis élastiques, où les appuis élastiques sont représentés par des raideurs de ressort, fonction de la rigidité en flexion transversale des parties adjacentes des éléments plans et des conditions aux limites de ces éléments.

L'effet du flambement local et de distorsion est expliqué comme suite (Réf.[1]).

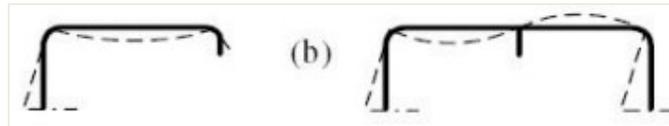
Dans le cas où on considère un renfort plat au voilement / flambement local, il faut considérer trois modes de flambement possibles.

Les modes sont :

- Mode 1 : le renfort flambe entièrement, donc il flambe avec la même courbure que la partie de la section. Ce mode est souvent référencé comme « Flambement de distorsion » :



- Mode 2 : les sous-parties et le renfort flambent alors que les parties individuelles avec les liaisons entre ces éléments restent droites. Ce mode est référencé comme « Voilement / Flambement local ».

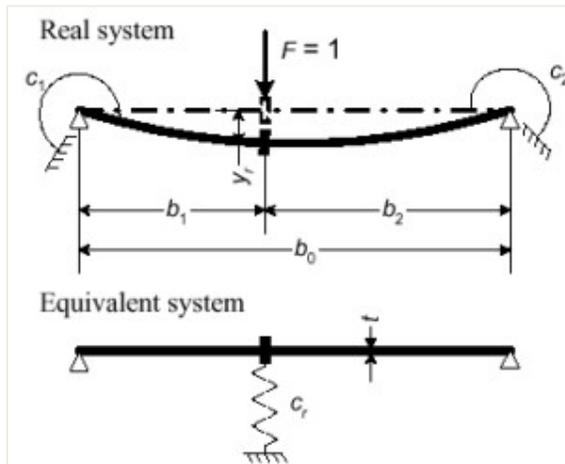


- Mode 3 : il s'agit d'une combinaison des modes 1 et 2 dans laquelle le flambement des sous-parties est superposé aux flambement de l'élément entier.

La procédure suivante est appliquée pour le calcul du coefficient de réduction d'un raidisseur intermédiaire (RI) ou d'un raidisseur de bord (RUO) :

- Étape 1 : Calcul de la rigidité du ressort

Rigidité du ressort $c = c_r$ pour RI :



Rigidité du ressort :

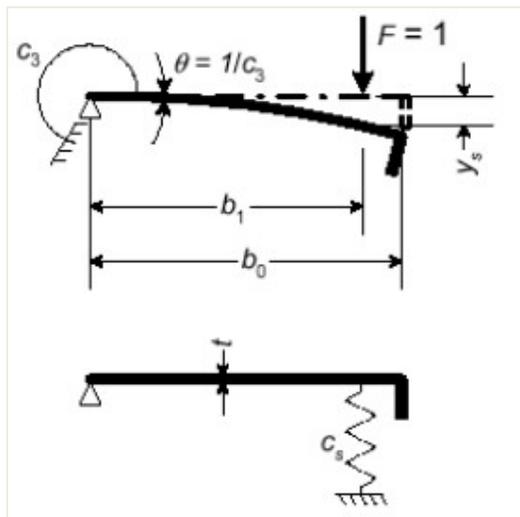
$$c_r = \frac{1}{y_r}$$

Avec :

$$y_r = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{E \cdot t^3 \cdot (b_1 + b_2)}$$

si $c_1 = c_2 = 0$

Rigidité du ressort $c = c_s$ pour RUO :



Rigidité du ressort :

$$c = c_s = \frac{1}{y_s}$$

Avec :

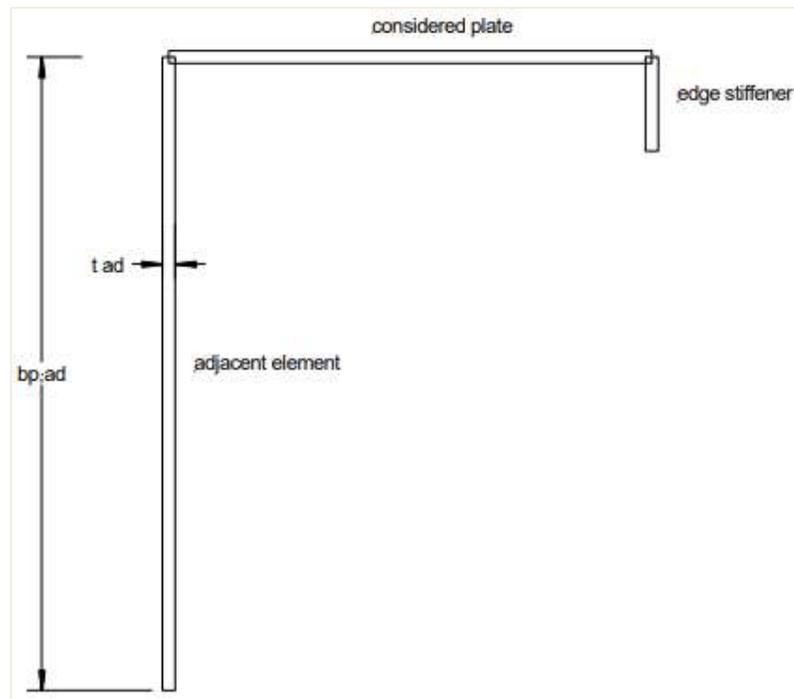
$$y_s = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_1^3}{E \cdot t^3} + \frac{b_1^2}{c_3}$$

$$c_3 = \sum \frac{\alpha \cdot E \cdot t_{ad}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_{p,ad}}$$

Avec :

- t_{ad} épaisseur de l'élément adjacent
- $b_{p,ad}$ largeur plate de l'élément adjacent
- c_3 somme des rigidités des éléments adjacents
- α égal à 3 dans le cas d'un moment de flexion ou lorsque la section est composée de plus de 3 éléments (comptabilisés comme des plaques dans la géométrie initiale, sans renforts)
 égal à 2 dans le cas de compression uniforme dans des sections composées de 3 éléments (comptabilisés comme des plaques dans la géométrie initiale, sans renforts, c'est-à-dire sections en U ou en Z)

Ces paramètres sont illustrés sur l'image suivante :



- Étape 2 : Calcul de l'aire et du moment d'inertie de l'aire

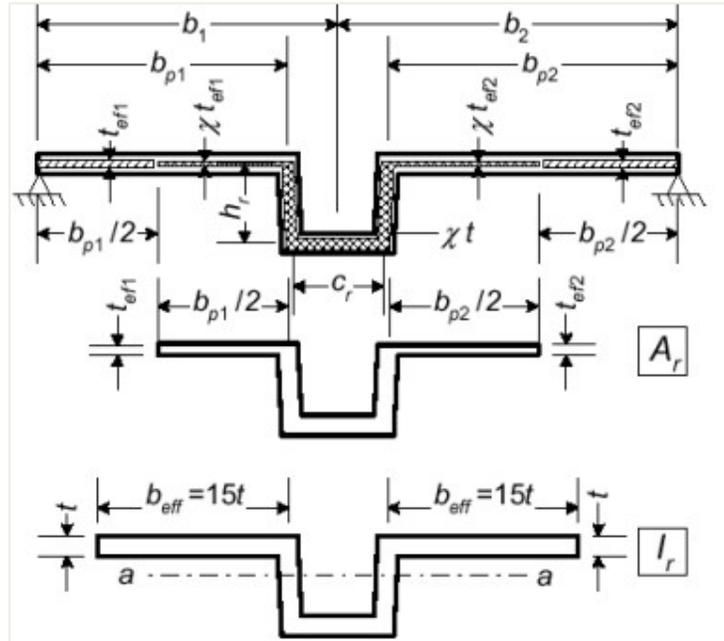
Après avoir calculé la rigidité du ressort, l'aire A_r et le moment d'inertie I_r sont calculés.

Avec :

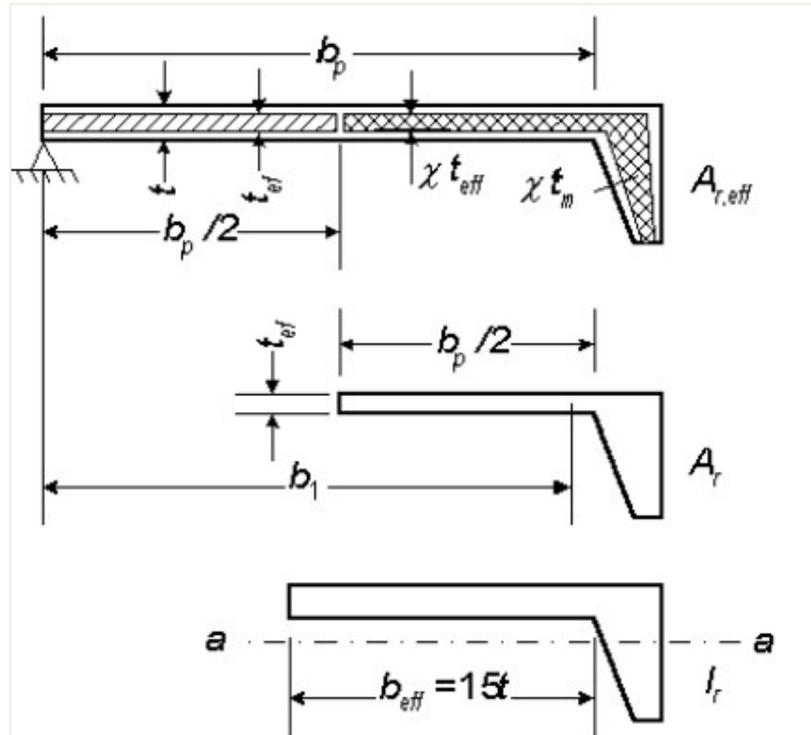
- A_r l'aire de la section effective (basé sur $t_{eff} = \rho_c t$) composée de l'aire du raidisseur et de la moitié des éléments plans adjacents.
- I_r le moment d'inertie de l'aire de la section effective composée du raidisseur (non réduit) et de la partie des éléments plats adjacents, avec l'épaisseur t et la largeur effective b_{eff} , avec pour référence l'axe neutre a-a.
- b_{eff} pris égal à 15 t pour le renfort RI
 pris égale à 12 t pour le renfort ROU

Ces paramètres sont illustrés sur l'image suivante.

Ar et Ir pour RI :



Ar et Ir pour RUO :



- Étape 3 : Calcul de la charge de flambement de raidisseur

La charge de flambement $N_{r,cr}$ du raidisseur peut maintenant être calculée comme suit :

$$N_{r,cr} = 2 \cdot \sqrt{c \cdot E \cdot I_r}$$

Avec :

- c rigidité du ressort de l'étape 1
- E module d'Young
- I_r moment d'inertie de l'aire de l'étape 2

- Étape 4 : Calcul du coefficient de réduction pour le flambement de distorsion

En utilisant la charge de flambement $N_{r,cr}$ et l'aire A_r , l'élanement relatif λ_c peut être déterminé pour calculer le coefficient de réduction χ .

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_0 A_r}{N_{r,cr}}}$$

Avec :

- $\alpha = 0,20$
- $\lambda_0 = 0,60$
- $\phi = 0,50 * [1,0 + \alpha \cdot (\lambda_c - \lambda_0) + \lambda_c^2]$

si $\lambda_c < \lambda_0$, alors $\chi = 1,00$

si $\lambda_c \geq \lambda_0$, alors :

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_c^2}} \leq 1,00$$

Avec :

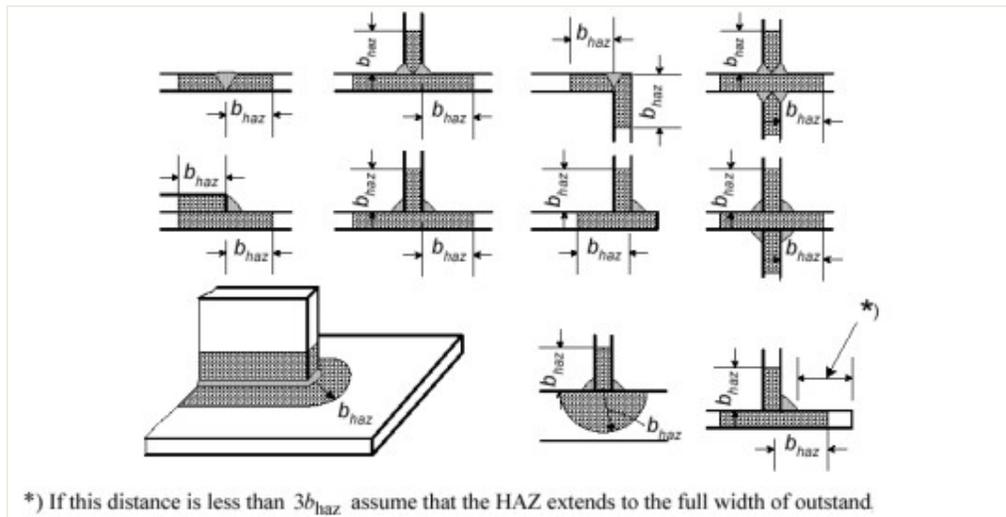
- f_0 : 0,2% de la limite élastique
- λ_c : élanement relatif
- λ_0 : élanement limite pris égal à 0,60
- A : imperfection prise égale à 0,20
- χ : coefficient de réduction pour le flambement de distorsion

Le coefficient de réduction est alors appliqué à l'épaisseur du / des renfort(s) et à la moitié de la largeur de la / des partie(s) adjacente(s).



Coefficient de réduction ρ_{ZAT} du aux effets ZAT

L'amplitude de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) est déterminée par la distance b_{ZAT} conformément à l'article 6.1.6.3 de la référence Réf.[1].



La valeur de b_{ZAT} est multipliée par les coefficients α_2 et $3/n$:

Pour les alliages 5xxx et 6xxx :

$$\alpha_2 = 1 + \frac{(T_1 - 60)}{120}$$

Pour les alliages 7xxx :

$$\alpha_2 = 1 + 1,5 * \frac{(T_1 - 60)}{120}$$

Avec :

T1 : température de pénétration

N : nombre de chemins de chaleur

NB : Les variations dans les nombres de chemins de chaleur $3/n$ sont spécifiquement destinées aux soudures d'angle. Dans le cas d'une soudure bout à bout, le paramètre n doit être réglé sur 3 (au lieu de 2) pour annuler cet effet.

Le coefficient de réduction pour la ZAT s'écrit :

$$\rho_{u,ZAT} = \frac{f_{u,ZAT}}{f_u}$$

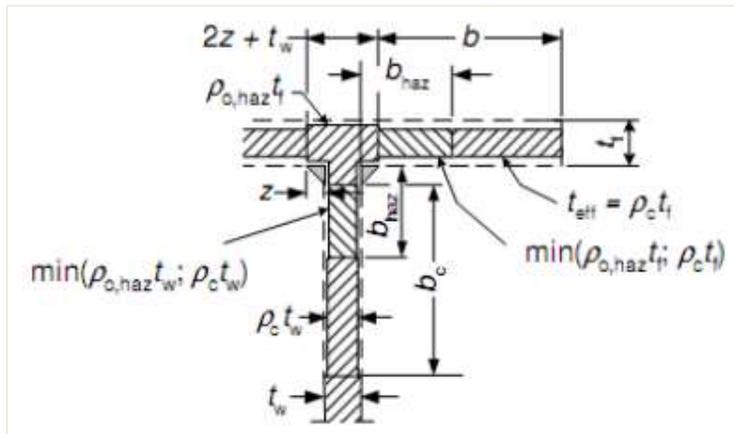
$$\rho_{0,ZAT} = \frac{f_{0,ZAT}}{f_0}$$

En éditant un profilé sur SCIA Engineer, l'utilisateur peut évaluer pour chaque composant (N, M_y et M_z), la classification déterminée et les coefficients de réduction via l'option « Lancer l'analyse » :

Part	Id	Pei	Signe (ég. Min)	Signe (ég. Max)	C1	C2	Det1	Det2	Det3	Det4	Dim	Eq. x (mm)	Eq. y (mm)	Ro x	Chi	Ro haz	Ro	RoID	At ₀ (mm ²)	W _{pl} (mm ³)	
	1	0.000	0.000	0.000	9.300	20.000	10.000	2.761	4.417	5.522	4	0.00	20.00	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0.00	0.00	
	2	0.000	0.000	0.000	28.000	195.000	20.000	9.939	14.388	19.878	4	0.00	90.00	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0.00	0.00	
	3	0.000	0.000	0.000	25.000	195.000	70.000	9.939	14.388	19.878	4	0.00	75.00	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0.00	0.00	
													75.00	128.00	1.000	1.000	0.000	0.000			
													125.00	200.00	1.000	1.000	1.000	1.000			
4	0.000	0.000	0.000	25.000	195.000	22.000	9.939	14.388	19.878	4	0.00	85.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0.00	0.00	
5	0.000	0.000	0.000	9.300	20.000	9.300	2.761	4.417	5.522	4	0.00	19.00	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0.00	0.00		

Calcul des propriétés effectives

Pour chaque partie, la réduction définitive de l'épaisseur ρ est déterminée comme le minimum entre $\chi \cdot \rho_c$ et ρ_{ZAT} .

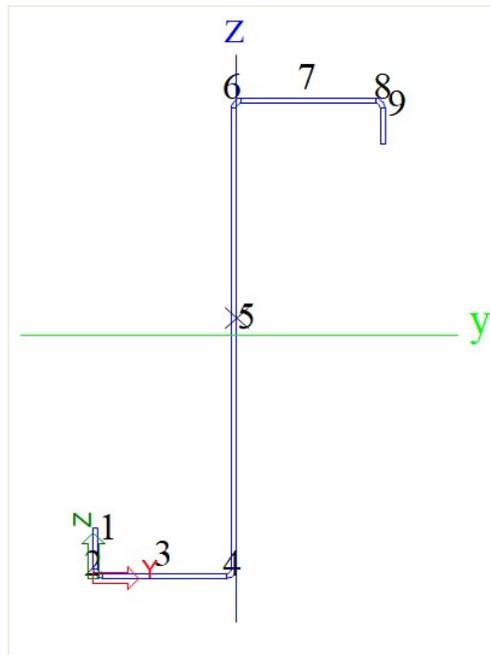


Les propriétés de la section sont alors recalculées à partir des épaisseurs réduites.

4.4. Exemple

Exemple : wsa_002.esa

Dans cet exemple, une vérification manuelle est effectuée pour une section ZED formée à froid. Une simple poutre de 6m de long sur deux appuis a été modélisée. La section est prise de la bibliothèque de profilés : Z(MET) 202/20. Les dimensions sont indiquées :



Les propriétés des matériaux sont comme indiquées dans l'EC-EN1999 : EN-AW 6082 (Sheet) T61/T6151 - 0- 12,5) :

$$f_0 = 205\text{N/mm}^2 \quad f_{0,ZAT} = 125\text{N/mm}^2$$

$$f_u = 280\text{N/mm}^2 \quad f_{u,ZAT} = 280\text{N/mm}^2$$

Courbe de flambement : a
Fabrication : soudé

Une soudure est faite au milieu de la partie 3. Les paramètres de cette soudure sont :

- Soudure MIG
- Alliage 6xxx
- Température de pénétration : 90°

Les différentes parties de la section (type) sont comme indiquées par SCIA Engineer :

Forme initiale										
	Yc [mm]	Zc [mm]	A [mm ²]	Ybeg [mm]	Zbeg [mm]	Yend [mm]	Zend [mm]	t [mm]	Type plaque	Type ferr.
1	1.00	12.50	34.00	1.00	21.00	1.00	4.00	2.00	U0	RU0
2	61.02	102.02	9.41	1.00	4.00	4.00	1.00	2.00	F	aucun
3	30.00	1.00	104.00	4.00	1.00	56.00	1.00	2.00	I	aucun
4	58.98	102.02	9.41	56.00	1.00	59.00	4.00	2.00	F	aucun
5	59.00	101.00	388.00	59.00	4.00	59.00	198.00	2.00	I	aucun
6	61.02	99.98	9.41	59.00	198.00	62.00	201.00	2.00	F	aucun
7	90.50	201.00	114.00	62.00	201.00	119.00	201.00	2.00	I	aucun
8	58.98	99.98	9.41	119.00	201.00	122.00	198.00	2.00	F	aucun
9	122.00	190.50	30.00	122.00	198.00	122.00	183.00	2.00	U0	RU0

Le calcul manuel est effectué pour le cas de compression (N-).

Classification

Conformément à l'article 6.1.4 Réf.[1] :

$\psi = \text{gradient de contrainte} = 1$ (compression dans toutes les parties)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = \sqrt{\frac{250}{205}} = 1,104$$

$$\eta = 0,70 + 0,30 \cdot \psi = 1$$

Pour toutes les parties sans gradient de contraintes (6.1.4.3 Réf.[1]) :

$$\beta = \frac{b}{t}$$

Parties	Type	b	t	β
1	RUO	20	2	10
2	I	58	2	29
3	I	200	2	100
4	I	63	2	31,5
5	RUO	18	2	9

Ensuite, les limites pour les classes 1, 2 et 3 sont calculées conformément à l'article 6.1.4.4 et au tableau 6.2 Réf.[1].

Les limites β_1 , β_2 et β_3 dépendent de la classe de flambement (A ou B), de la présence de soudures longitudinales et du type (parties internes ou externes).

Parties	Type	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε	β_1	β_2	β_3	Classe
1	RUO	3	4,5	6	3,31	4,97	6,62	4
2	I	11	16	22	12,14	17,66	24,29	4
3	I	9	13	18	9,94	14,36	19,88	4
4	I	11	16	22	12,14	17,66	24,29	4
5	RUO	3	4,5	6	3,31	4,97	6,62	4

Coefficient de réduction ρ_c pour le flambement local

ρ_c est calculé conformément à l'article 6.1.5 et aux formules (6.11) et (6.12) Réf.[1] (toutes les parties de classe 4) :

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2}$$

Parties	β	C_1	C_2	ρ_c
1	10	10	24	0,811
2	29	32	220	0,899
3	100	29	198	0,296
4	31,5	32	220	0,851
5	9	10	24	0,866

🚩 **Coefficient de réduction χ pour le flambement de distorsion**

Le flambement de distorsion doit être calculé pour les parties 1-2 et les parties 4-5.

▪ **Parties 1-2**

Étape 1 : calcul de la rigidité du ressort

$$c = c_s = \frac{1}{y_s}$$

$$y_s = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_1^2}{Et^3} + \frac{b_1^2}{c_3}$$

$$c_3 = \sum \frac{\alpha \cdot E \cdot t_{ad}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_{p,ad}}$$

Avec :

$$\alpha = 3$$

$$E = 70000 \text{N/mm}^2$$

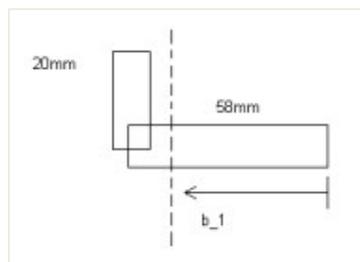
$$\nu = 0,3$$

$$t_{ad} = 2 \text{mm}$$

$$b_{p,ad} = 200 \text{mm (longueur de la troisième partie)}$$

Cela nous donne :

$$c_3 = \frac{2 \cdot 70000 \cdot 2^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 200} = 512,82 \text{Nrad}$$



$$b_1 = \frac{(58 \cdot 2) \cdot 58/2 + (20 \cdot 2) \cdot 58}{(58 \cdot 2) + (20 \cdot 2)} = 36,44 \text{mm}$$

$$y_s = \frac{4 * (1 - 0,3^2) * 36,44^3}{70000 * 2^3} + \frac{36,44^2}{512,82} = 2,903 \text{mm}^2/\text{N}$$

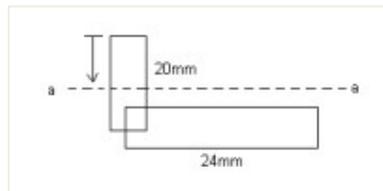
$$c = c_s = \frac{1}{y_s} = \frac{1}{2,903} = 0,344 \text{N/mm}^2$$

Étape 2 : calcul de l'aire et de son moment d'inertie

La moitié de l'élément adjacent = (58 / 2)mm

ρ_c pour partie (2) = 0,899

$$A_r = 20 * 2 + \frac{58}{2} * 2 * 0,899 = 92,142 \text{mm}^2$$



b_{eff} = pour le renfort RUO pris égal à 12*t

t = 2mm

b_{eff} = 24mm

$$y = \frac{(20 * 2) * 20/2 + (24 * 2) * 20}{(20 * 2) + (24 * 2)} = 15,45 \text{mm}$$

$$I_r = \frac{2 * 20^3}{12} + (20 * 2) * \left(15,45 - \frac{20}{2}\right)^2 + \frac{24 * 2^3}{12} + (24 * 2) * (20 - 15,45)^2$$

$$I_r = 3531,15 \text{mm}^4$$

Étape 2 : calcul de l'aire et de son moment d'inertie

$$N_{r,\text{cr}} = 2 * \sqrt{c * E * I_r} = 2 * \sqrt{0,344 * 70000 * 3531,15} = 18454,4 \text{N}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_0 * A_r}{N_{r,\text{cr}}}} = \sqrt{\frac{205 * 92,142}{18454,4}} = 1,0117$$

$$\alpha = 0,2$$

$$\lambda_0 = 0,60$$

$$\lambda_c > \lambda_0$$

$$\phi = 0,50 * [1 + 0,2 * (1,0117 - 0,6) + 1,0117^2] = 1,0529$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_c^2}} = 0,743$$

Kappa : coefficient de réduction pour le flambement de distorsion

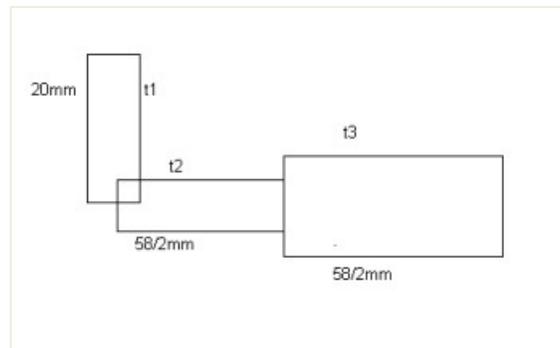
▪ **Calcul de l'épaisseur effective**

t₁, t₂ et t₃ sont les épaisseurs des parties (1) et (2) :

$$t_1 = 2 * \rho_c * \chi = 2 * 0,811 * 0,743 = 1,205\text{mm}$$

$$t_2 = 2 * \rho_c * \chi = 2 * 0,899 * 0,743 = 1,336\text{mm}$$

$$t_3 = 2 * \rho_c = 2 * 0,899 = 1,798\text{mm}$$



▪ **Parties 4-5**

Étape 1 : calcul de la rigidité du ressort

$$c = c_s = \frac{1}{y_s}$$

$$y_s = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_1^2}{Et^3} + \frac{b_1^2}{c_3}$$

$$c_3 = \sum \frac{\alpha \cdot E \cdot t_{ad}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_{p,ad}}$$

Avec :

$$\alpha = 3$$

$$E = 70000\text{N/mm}^2$$

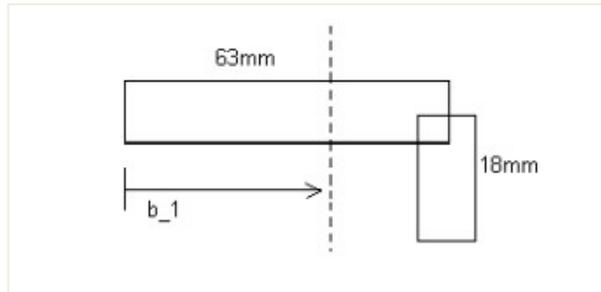
$$\nu = 0,3$$

$$t_{ad} = 2\text{mm}$$

$$b_{p,ad} = 200\text{mm (longueur de la troisième partie)}$$

Cela nous donne :

$$c_3 = \frac{2 * 70000 * 2^3}{12 * (1 - 0,3^2) * 200} = 512,82 \text{Nrad}$$



$$b_1 = \frac{(63 * 2) * \frac{63}{2} + (18 * 2) * 63}{(63 * 2) + (18 * 2)} = 38,5 \text{mm}$$

$$y_s = \frac{4 * (1 - 0,3^2) * 368,5^3}{70000 * 2^3} + \frac{38,5^2}{512,82} = 3,2613 \text{mm}^2/\text{N}$$

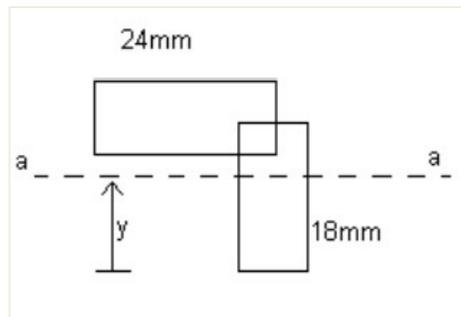
$$c = c_s = \frac{1}{y_s} = \frac{1}{3,26} = 0,3066 \text{N/mm}^2$$

Étape 2 : calcul de l'aire et de son moment d'inertie

La moitié de l'élément adjacent = $(63 / 2) \text{mm}$

ρ_c pour partie (4) = 0,851

$$A_r = 18 * 2 + \frac{63}{2} * 2 * 0,851 = 89,613 \text{mm}^2$$



b_{eff} = pour le renfort RUO pris égal à $12 * t$

$$t = 2 \text{mm}$$

$$b_{\text{eff}} = 24 \text{mm}$$

$$y = \frac{(18 * 2) * 18/2 + (24 * 2) * 18}{(18 * 2) + (24 * 2)} = 14,14\text{mm}$$

$$I_r = \frac{24 * 2^3}{12} + (24 * 2) * (18 - 14,14)^2 + \frac{2 * 18^3}{12} + (18 * 2) * \left(14,14 - \frac{18}{2}\right)^2$$

$$I_r = 2654,29\text{mm}^4$$

Étape 2 : calcul de l'aire et de son moment d'inertie

$$N_{r,cr} = 2 * \sqrt{c * E * I_r} = 2 * \sqrt{0,3066 * 70000 * 2654,29} = 15095,8\text{N}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_0 * A_r}{N_{r,cr}}} = \sqrt{\frac{205 * 89,613}{15095,8}} = 1,103$$

$$\alpha = 0,2$$

$$\lambda_0 = 0,60$$

$$\lambda_c > \lambda_0$$

$$\phi = 0,50 * [1 + 0,2 * (1,103 - 0,6) + 1,103^2] = 1,159$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_c^2}} = 0,661$$

Kappa : coefficient de réduction pour le flambement de distorsion

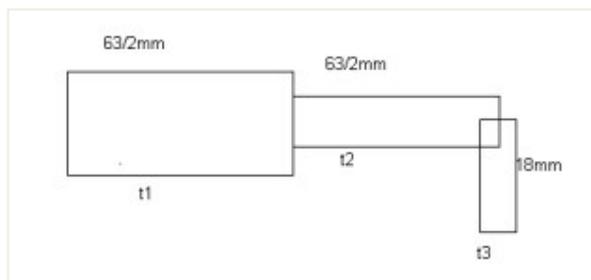
▪ **Calcul de l'épaisseur effective**

t_1 , t_2 et t_3 sont les épaisseurs des parties (4) et (5) :

$$t_1 = 2 * \rho_c = 2 * 0,851 = 1,702\text{mm}$$

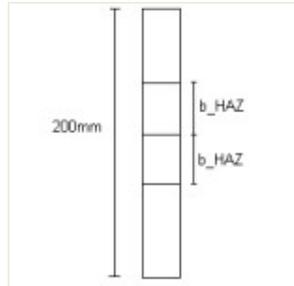
$$t_2 = 2 * \rho_c * \chi = 2 * 0,851 * 0,661 = 1,125\text{mm}$$

$$t_3 = 2 * \rho_c * \chi = 2 * 0,866 * 0,661 = 1,145\text{mm}$$



🔧 **Coefficient de réduction ρ_{ZAT} pour les effets de soudure**

La soudure se trouve au milieu de la partie (3) :



Données :

$$t = 2\text{mm}$$

Soudure MIG : conformément à Réf.[1] 6.1.6.3 :

(3) For a MIG weld laid on unheated material, and with interpass cooling to 60°C or less when multi-pass welds are laid, values of b_{haz} are as follows:

$$0 < t \leq 6 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 20 \text{ mm}$$

$$6 < t \leq 12 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 30 \text{ mm}$$

$$12 < t \leq 25 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$$

$$t > 25 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 40 \text{ mm}$$

$$0 < t \leq 6\text{mm} \Rightarrow b_{ZAT} = 20\text{mm}$$

Température (alliage 6xxx) :

$$\alpha_2 = 1 + \frac{90 - 60}{120} = 1,25$$

Cela nous donne :

$$b_{ZAT} = 1,25 * 20 = 25\text{mm}$$

$$ZAT - \text{zone} = 2 * b_{ZAT} = 50\text{mm}$$

$$\rho_0 = \frac{f_{0,ZAT}}{f_0} = \frac{125}{205} = 0,610$$

$$\rho_c \text{ dans la partie (3)} = 0,296$$

Cela signifie que le flambement local est limité et pas les effets ZAT ($\rho_z = 0,61$).

Epaisseur de la partie (3) :

$$t_1 = 2 * \rho_c * \chi = 2 * 0,296 = 0,592$$

 **Calcul de l'aire effective pour la compression uniforme (N-)**

Partie (1) :

$$20 * 1,205 = 24,1\text{mm}^2$$

$$\frac{58}{2} * 1,336 = 38,7\text{mm}^2$$

Partie (2) :

$$\frac{58}{2} * 1,798 = 52,1\text{mm}^2$$

$$75 * 0,592 = 44,4\text{mm}^2$$

Partie (3) :

$$50 * 0,592 = 29,6\text{mm}^2$$

$$75 * 0,592 = 44,4\text{mm}^2$$

$$\frac{63}{2} * 1,702 = 53,6\text{mm}^2$$

Partie (4) :

$$\frac{63}{2} * 1,064 = 35,4\text{mm}^2$$

Partie (5) :

$$18 * 1,145 = 20,6\text{mm}^2$$

L'aire effective totale est la somme des valeurs ci-dessus = 343mm².

 **Comparaison avec SCIA Engineer**

Dans le menu « Bibliothèque » et « Sections », cliquer sur la section utilisée puis sur « Modifier ». Cliquer alors sur « Classification et section efficace ». L'utilisateur peut manuellement vérifier le calcul de classification effectué, les coefficients de réduction et les résultats intermédiaires.

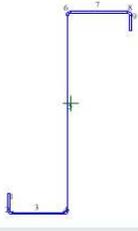
Classification et section efficace

TYPE D'INTRODUCTION

- Traction N+
- Compression N-
- Flexion My+
- Flexion My-
- Flexion Mz+
- Flexion Mz-

Adoucissement ZAT
p_{o,haz}

Pas des itérations d'affichage
1



Introduction
Type d'introduction : Compression N-
Adoucissement ZAT : p_{o,haz}

f _o [MPa]	f _{o,haz} [MPa]	p _{o,haz} [-]	f _u [MPa]	f _{u,haz} [MPa]	p _{u,haz} [-]	ε
205.0	125.0	0.61	280.0	195.0	0.66	1.10

Classification selon EN 1999-1-1 article 6.1.4

Id	Type	σ1 [kN/m ²]	σ2 [kN/m ²]	ψ	β	β1	β2	β3	Classe
1	UO	1.413	1.413	1.0	8.5	3.3	5.0	8.6	4
3	I	1.413	1.413	1.0	20.0	9.9	14.4	19.9	4
5	I	1.413	1.413	1.0	57.0	12.1	17.7	24.3	4
7	I	1.413	1.413	1.0	29.5	12.1	17.7	24.3	4
9	UO	1.413	1.413	1.0	7.5	3.3	5.0	8.6	4

La section est classée en classe 4

Section efficace selon EN 1999-1-1 article 6.1.5 et 6.1.6

Id	Type	Type d'armature	Déb.x [mm]	Fin.x [mm]	C1 [-]	C2 [-]	A _r [mm ²]	I _r [mm ⁴]	p _c [-]	X [-]	phaz. [-]	ρ [-]
1	UO	RUO	0.00	17.00	10.0	24.0	88.99	3599.86	0.9	1.0	1.0	0.9
3	I	Aucun	0.00	1.00	29.0	198.0	0.00	0.00	0.9	1.0	1.0	0.9
3	I	Aucun	1.00	26.00	29.0	198.0	0.00	0.00	0.9	1.0	0.9	0.9
3	I	Aucun	26.00	51.00	29.0	198.0	0.00	0.00	0.9	1.0	0.9	0.9
3	I	Aucun	51.00	52.00	29.0	198.0	0.00	0.00	0.9	1.0	1.0	0.9
5	I	Aucun	0.00	194.00	32.0	220.0	0.00	0.00	0.3	1.0	1.0	0.3
7	I	Aucun	0.00	28.50	32.0	220.0	0.00	0.00	0.9	1.0	1.0	0.9
7	I	Aucun	28.50	57.00	32.0	220.0	0.00	0.00	0.9	1.0	1.0	0.9
9	UO	RUO	0.00	15.00	10.0	24.0	91.26	2670.98	1.0	1.0	1.0	0.9

A	I _y	I _z	W _{ely}	W _{ez}	e _y UCS	e _z UCS	α
[mm ²]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ³]	[mm ³]	[mm]	[mm]	[deg]
3.9407e+02	3.1978e+06	1.6035e+06	2.3678e+04	4.7512e+06	62.82	110.37	-15.76

Prêt [en]

OK Annuler

4.5. Section

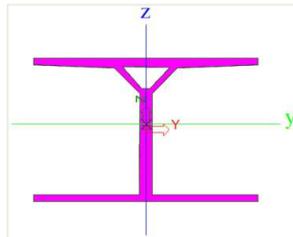
Exemple : wsa_003.esa

Profilé avec importation d'un fichier DWG (dwg profile.dwg)

Conversion en forme paroi mince pour être utilisé dans le contrôle aluminium

Définition de l'échelle, sélection des polygones, import, conversion en forme paroi mince

Uniquement après cela, la forme réduite peut être utilisée.



Chapitre 5: Contrôle ELS

5.1. Déplacement des nœuds

Exemple : wsa_001a.esa

Combinaisons ELS

Limite de la flèche horizontale δ pour la poutre B1 :

$$\frac{h}{150} = \frac{5500}{150} = 36,7\text{mm}$$

Déformation horizontale maximale :

$$21\text{mm} < 36,7\text{mm}$$

Déplacement des nœuds

Calcul linéaire

Combinaison: SLS

Extrême: Global

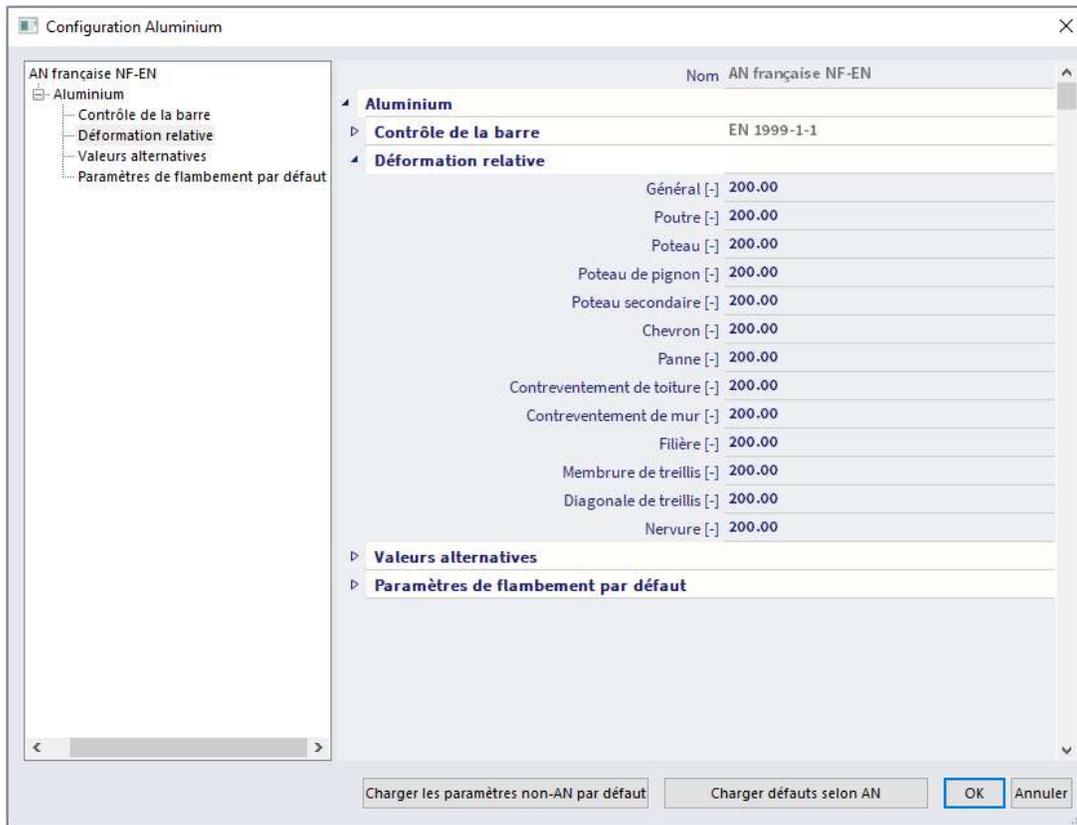
Sélection: Tout

Nom	Cas	U_x [mm]	U_z [mm]
N4	SLS/1	-20.4	0.3
N6	SLS/2	21.0	0.2
N4	SLS/3	0.3	-0.3
N4	SLS/4	-19.6	0.3

5.2. Déformations relatives

Pour chaque type de poutre, les valeurs limites pour les flèches relatives sont définies via « Configuration Aluminium » du poste de travail « Aluminium » des outils de processus, ou bien par le menu Dimensionnement / Aluminium / Configuration. Elles apparaissent dans l'onglet « Déformation relative ».

Cette option permet de vérifier les déformations relatives. Celles-ci sont données en valeur absolue, en valeur relative par rapport à la travée, ou comme contrôle unité par rapport à la limite pour la valeur relative à la travée.



Exemple : wsa_001b.esa

Définition du type de poutre pour les éléments B5 et B6 : poutre et arbalétrier.

Définition des limites pour les déformations relatives :

- Poutre : 1/1000
- Arbalétrier : 1/500

Contrôle de la déformation relative sur les éléments B5 et B6 (dans « Déformations 1D » du poste de travail « Résultats » dans les outils du processus):

Déformations 1D

Calcul linéaire
 Combinaison: SLS
 Système de coordonnées: Elément
 Extrême 1D: Global
 Sélection: B5, B6

Déformations relatives

Nom	dx [m]	Cas	U _z [mm]	U _{z,rel} [1/xx]
B6	5.401	SLS/1	8.9	1/1136
B6	4.810	SLS/2	-6.2	-1/1638
B5	2.765	SLS/3	8.5	1/713

B5 : L = 6,1m Limite : $6083 / 1000 = 6,1\text{mm}$

$$U_z = 8,5\text{mm} \quad \Rightarrow 8,5 / 6083 = 1 / 715$$

$$\text{Contrôle : } (1 / 713) / (1 / 1000) = 1,40$$

B6 : L = 10,127m Limite : $10127 / 500 = 20,3\text{mm}$

$$U_z = 8,9\text{mm} \quad \Rightarrow 8,9 / 10127 = 1 / 1137$$

$$\text{Contrôle : } (1 / 1136) / (1 / 500) = 0,44$$

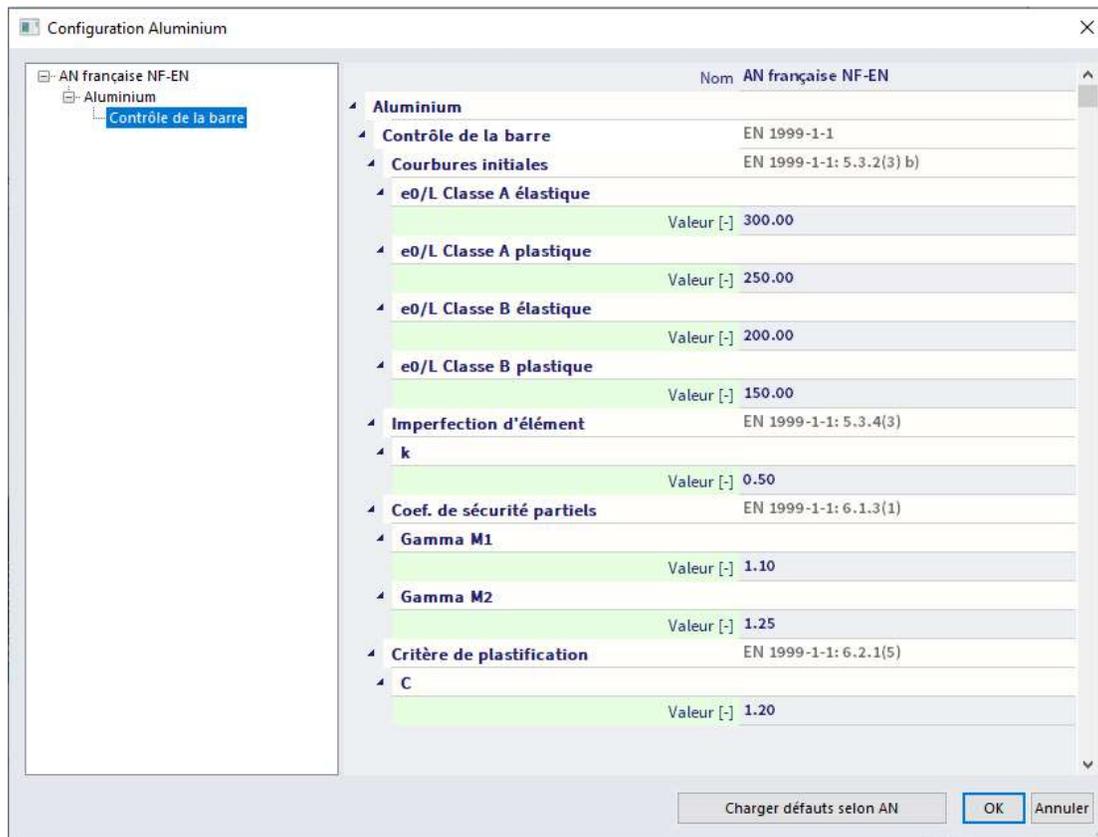


Chapitre 6: Données additionnelles

6.1. Configuration

Les annexes nationales du contrôle aluminium selon la norme peuvent être adaptées dans les « Paramètres du projet », et « Annexes nationales », « EN 1999 : conception de structures en aluminium », « EN 1999-1-1 « Règles de structure générales ». Dans cette fenêtre, les options suivantes peuvent être ajustées :

- Les imperfections en arc pour chaque classe
- Les imperfections d'élément
- Les coefficients partiels de sécurité
- Le critère de résistance élastique / plastique



Dans les outils du processus, dans le poste de travail « Aluminium », dans la « Configuration Aluminium », l'utilisateur peut modifier les paramètres de configuration de base pour le contrôle selon la norme des éléments en aluminium.

Dans « Contrôle de la barre », les paramètres ci-dessous peuvent être adaptés :

- « Nœuds déplaçables par défaut »
- « Coefficients de flambement k_y, k_z »
- « Calcul de x_s »
- « Configuration générale »

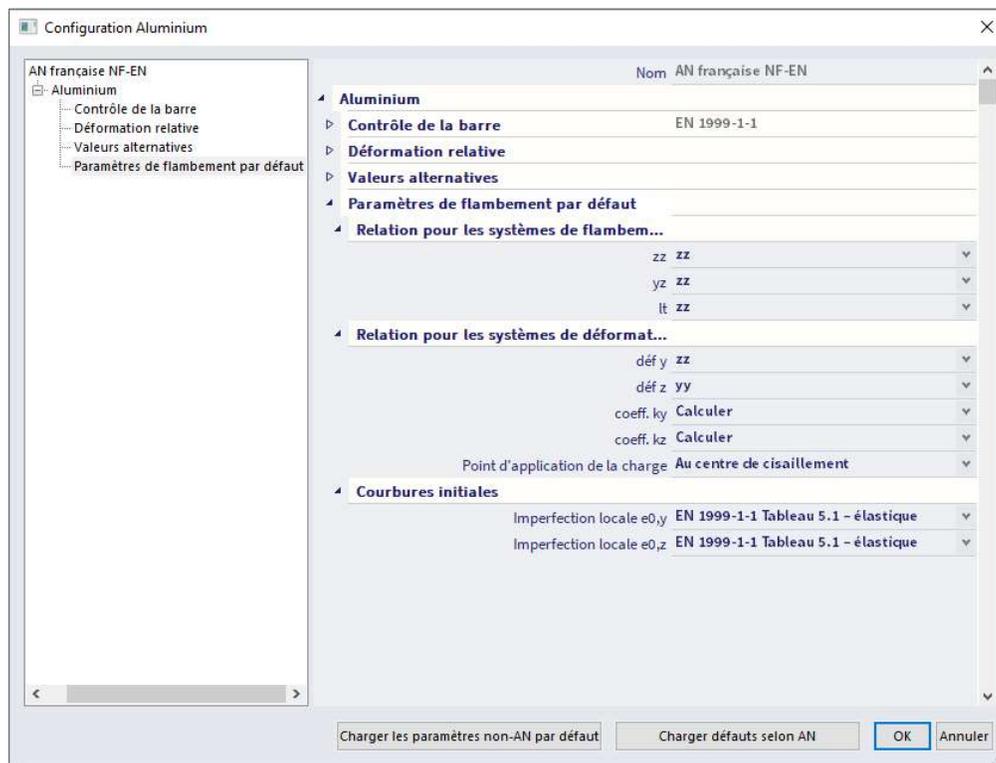
Dans ce dernier paragraphe, l'utilisateur trouve notamment :

- « **Contrôle élastique uniquement** » :
Toutes les sections seront de classe 3.
- « **Contrôle en section seulement** » :
Seul le contrôle en section est effectué. Aucun contrôle de stabilité ne sera exécuté.
- « **Flambement flexionnel prise en compte par le calcul** » :
Lorsque cette option est sélectionnée, aucun contrôle en flambement n'est effectué. Seul le contrôle au déversement sera pris en compte dans le contrôle de stabilité.

Dans « Déformation relative », l'utilisateur peut saisir les déformations admissibles pour différents types de barres.

Dans « Valeurs alternatives », l'utilisateur peut choisir entre les valeurs alternatives pour différents paramètres conformément à l'EC-EN 1999-1-1.

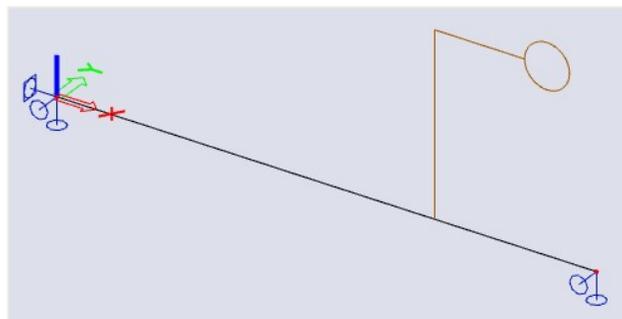
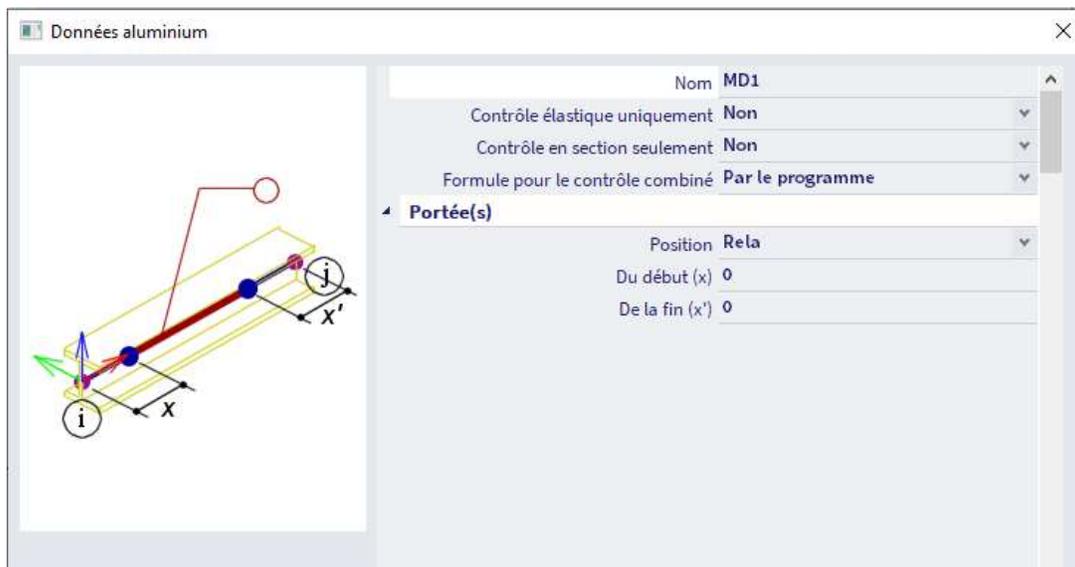
Dans les « Paramètres de flambement par défaut », l'utilisateur peut saisir le système de déformation par défaut qui sera appliqué à tous les éléments. Dans la fenêtre de propriétés d'un élément 1D pris séparément, les paramètres de flambement peuvent être modifiés localement.



6.2. Donnée de l'élément aluminium

Les valeurs par défaut utilisées dans le menu « Configuration Aluminium » peuvent être dépassées pour un élément particulier en utilisant l'option « Données élément aluminium » :

- « **Contrôle élastique uniquement** » :
Les éléments sélectionnés seront de classe 3.
- « **Contrôle en section seulement** » :
Pour les éléments sélectionnés, seul le contrôle en section sera effectué. Aucun contrôle en stabilité ne sera exécuté.
- « **Formule pour le contrôle combiné** » :
Choix des formules de calcul pour le contrôle en section et en stabilité.
- « **Portée(s)** » :
Seuls les efforts internes dans la portée définie seront pris en compte dans le contrôle de l'élément.

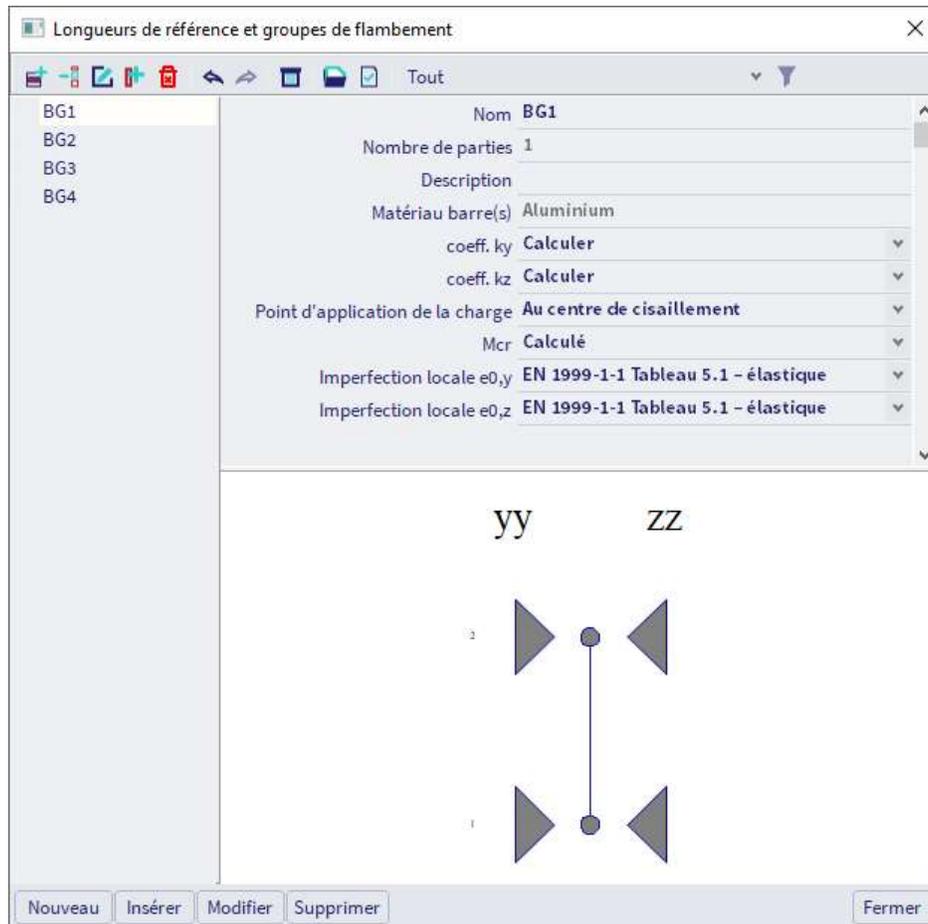


6.3. Longueurs de référence et groupes de flambement

Les « Longueurs de référence et groupes de flambement » sont accessible ou bien :

- Par le menu « Bibliothèques » / « Structure, analyse » (cliquer sur « Nouveau » pour créer un nouveau groupe ou sur « Editer » pour modifier un groupe existant).
- Par le panneau de propriétés d'un élément 1D

Par le menu « Bibliothèque » / « Structure, analyse », la fenêtre « Longueurs de référence et groupes de flambement » est une bibliothèque qui regroupe les groupes de flambement définis (BG's).



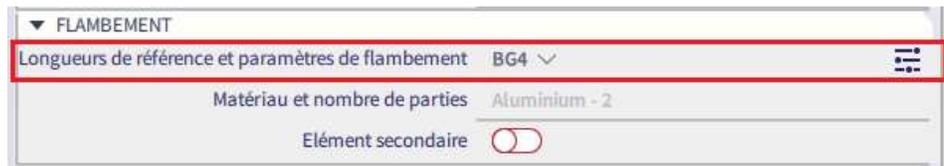
Sur la partie gauche, une liste définit les différents groupes de flambement présents dans le projet. Il est possible de sélectionner plusieurs groupes en même temps de manière à modifier les paramètres communs à ces groupes en une seule fois.

Dans un groupe de flambement, vous pouvez éditer le coefficient k_y , le coefficient k_z , le point d'application de la charge, le moment élastique critique M_{cr} , l'imperfection en arc $e_{0,y}$ et l'imperfection en arc $e_{0,z}$.

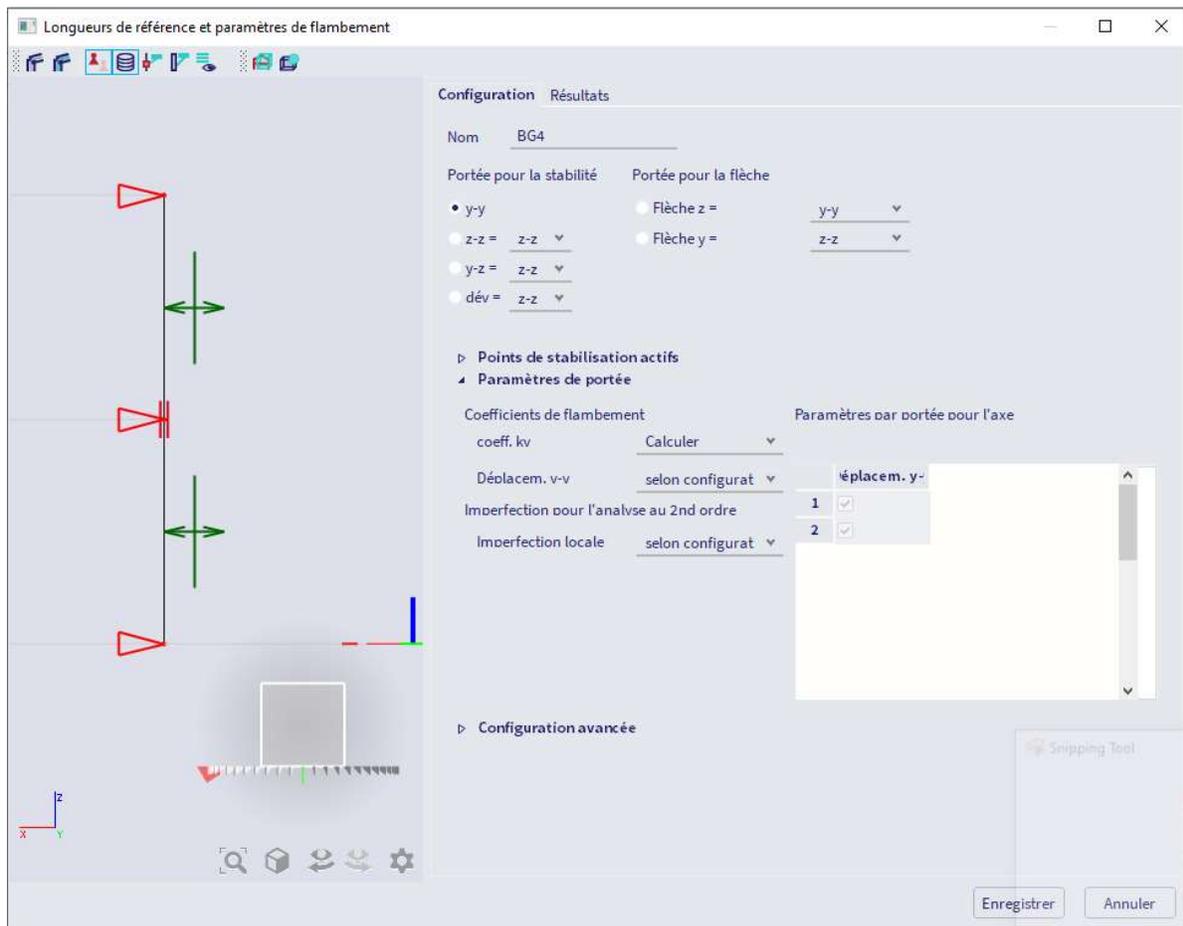
Il est possible de créer un nouveau groupe de flambement en cliquant sur « Nouveau » en bas de la liste, et également d'« Insérer » un nouveau groupe de flambement sous le groupe sélectionné / en cours.

L'option « Éditer » permet à l'utilisateur d'éditer le groupe de flambement sélectionné dans cette fenêtre.

Les paramètres liés au flambement qui sont configurés dans cette fenêtre sont sauvegardés et peuvent être visualisés dans le panneau de propriétés d'un élément 1D, et assignés à cet élément 1D, comme présenté dans l'exemple ci-dessous :



L'utilisateur peut ouvrir la fenêtre de « Groupe de flambement et longueurs système » en cliquant sur les trois points de la ligne :

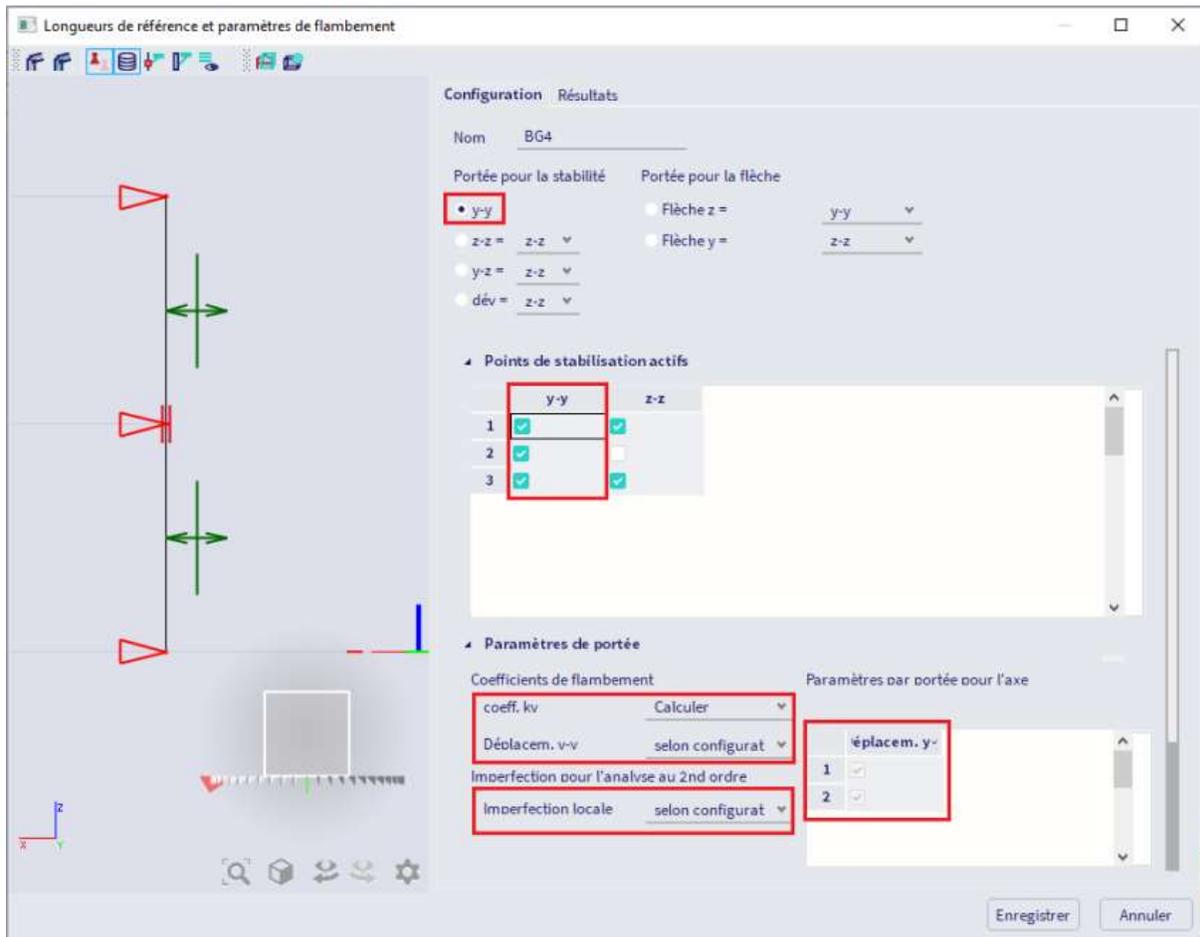


La partie gauche de la fenêtre propose une représentation graphique de l'élément 1D du système de flambement avec ses contraintes et les informations de déplacement par travée. Ce n'est pas seulement une représentation des paramètres mentionnés précédemment, mais cette fenêtre permet également des modifications directement dans la zone graphique, en cliquant sur les contraintes de flambement (triangles rouges) pour les rendre libres ou bloquées, ou en cliquant sur les symboles de déplacement (flèches vertes) par travée pour déclarer « nœuds déplaçables » ou non.

Les éléments qui appartiennent au système de flambement sont visualisés par une ligne noire, alors que les autres éléments du projet sont en gris clair. Cela permet rapidement de savoir quels sont les éléments qui

sont utilisés dans ce groupe de flambement. Aussi, les symboles de contraintes (triangles ou rectangles rouges) et les symboles de déplacements ne sont visualisés que sur une ligne système.

Les paramètres de flambement sont visualisés dans la boîte de dialogue à partir des travées sélectionnées. Cela définit le contexte des paramètres qui sont visualisés. Par exemple, lorsque les paramètres y-y sont sélectionnés, la fenêtre graphique montre les contraintes de flambement pour y-y de même que les paramètres de déplacement y-y.



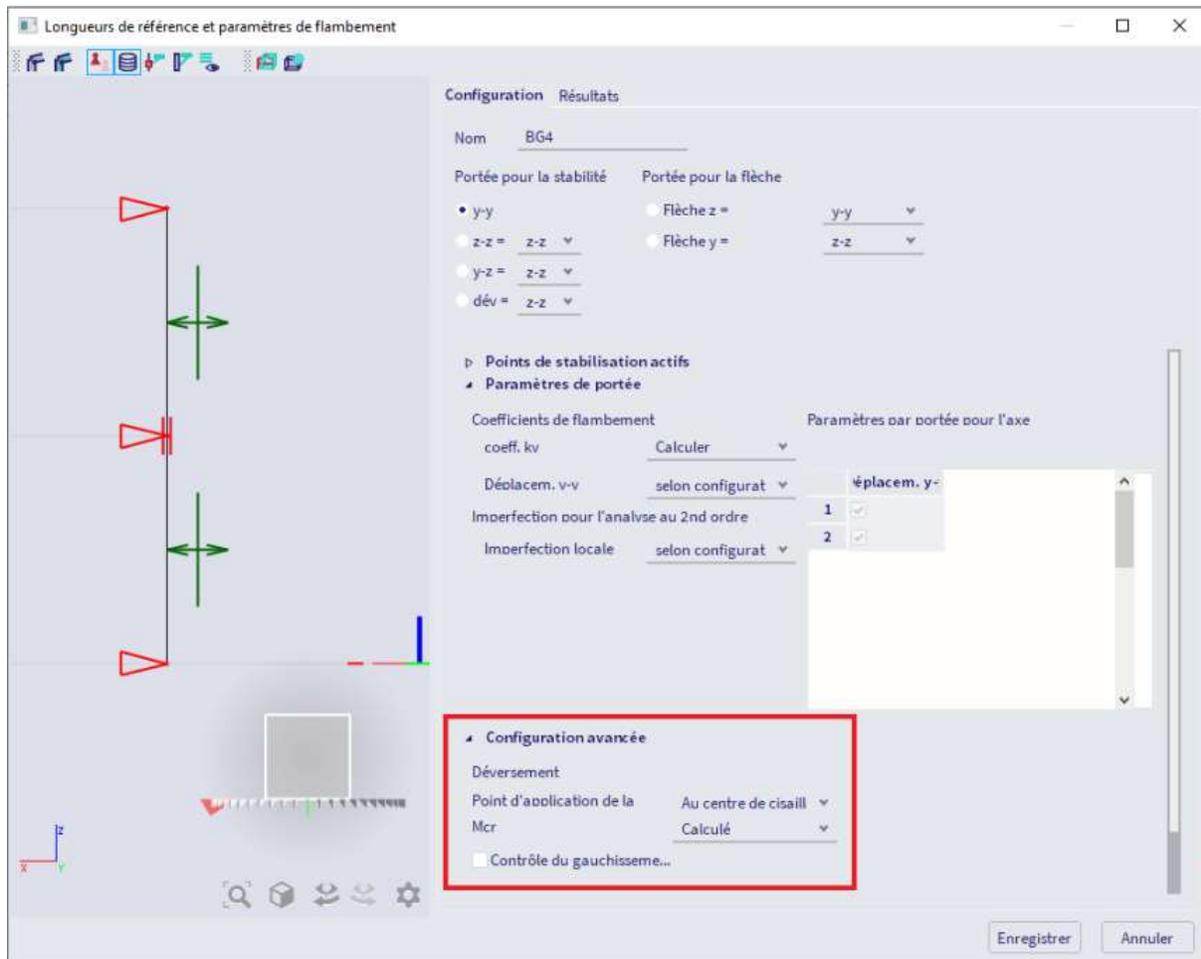
L'utilisateur peut faire de même pour z-z en sélectionnant « z-z » dans la « Portée pour la stabilité » en haut de la fenêtre.

Le tableau de contraintes « Points de stabilisation actifs » permet à l'utilisateur de modifier les contraintes de flambement ou de flèche sous forme de tableau. Une alternative serait de le faire par travée (y-y, z-z, ...) directement dans la fenêtre graphique en cliquant sur les symboles rouges (triangles / rectangles). Toutes les contraintes actives / inactives sont visualisables dans le tableau.

Sous ce tableau, vous trouverez tous les « Paramètres de portée » liés aux travées. Les paramètres (y-y, z-z, y-z, déversement) qui sont présentés dans le paragraphe « Paramètres de portée » dépendent de la sélection effectuée en haut de la boîte de dialogue.

Dans la partie « Configuration avancée », l'utilisateur peut éditer les paramètres de déversement :

- Point d'application de la charge : il s'agit de la position de la charge qui sera appliquée sur l'élément 1D (en haut, au centre de cisaillement, en bas, toujours déstabilisant, toujours stabilisant). Ce paramètre influence le calcul M_{cr} pour la vérification du déversement.
- M_{cr} : ce paramètre peut être calculé ou bien saisi manuellement dans la paramètres de la travée pour le déversement.



Le tableau de résultats est disponible si les deux conditions suivantes sont remplies :

- Le groupe de flambement est assigné à un élément ou un groupe d'éléments,
- Le projet est calculé (calcul linéaire).

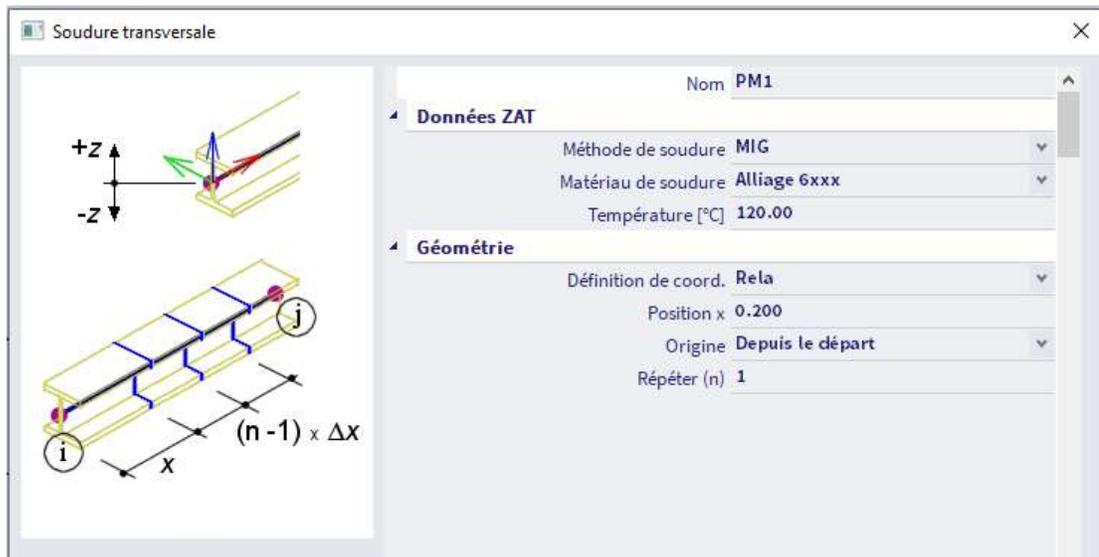
Le tableau de résultats peut être envoyé à la note de calcul si nécessaire en utilisant l'icône adéquate qui se trouve en haut de la fenêtre.

6.4. Donnée des éléments

✚ Soudures transversales

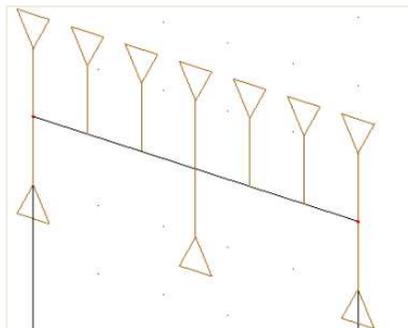
Par cette option, l'utilisateur peut saisir différentes soudures dans certaines parties de l'élément. Les données nécessaires au calcul de ces soudures sont :

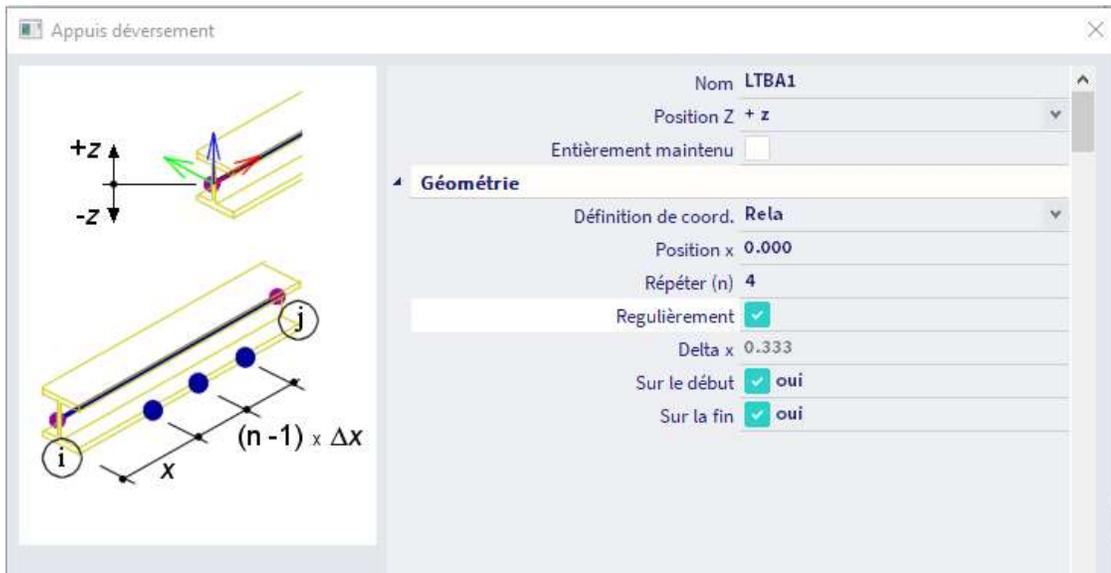
- La méthode de soudure : MIG ou TIG
- Le matériau de soudure : type d'alliage
- La température de la soudure
- La géométrie : la position de la soudure dans l'élément



✚ Contraintes de déversement

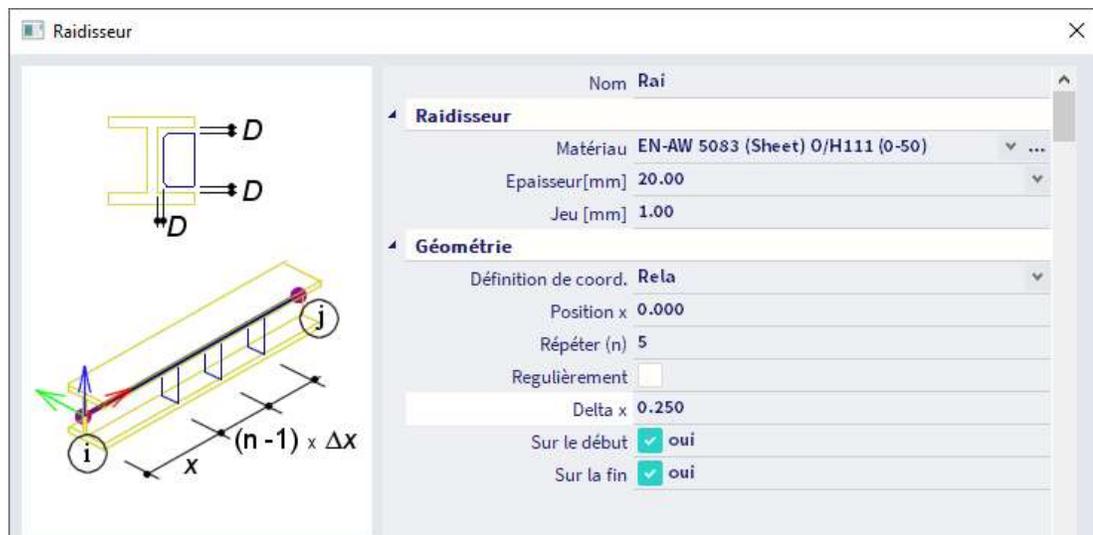
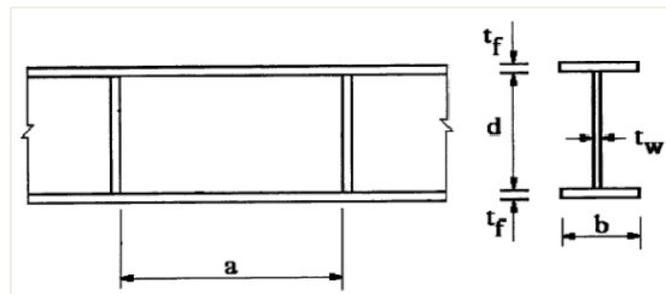
Les données de déversement sont remplacés par les « appuis déversement ». Ceux-ci sont définis sur les ailes supérieures ou sur les ailes inférieures. Les longueurs de déversement pour l'aile comprimée sont prises comme égales à la distance entre ces appuis. Les coefficients de moments sont calculés entre ces appuis.



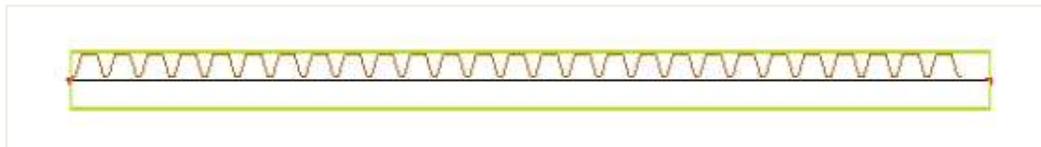
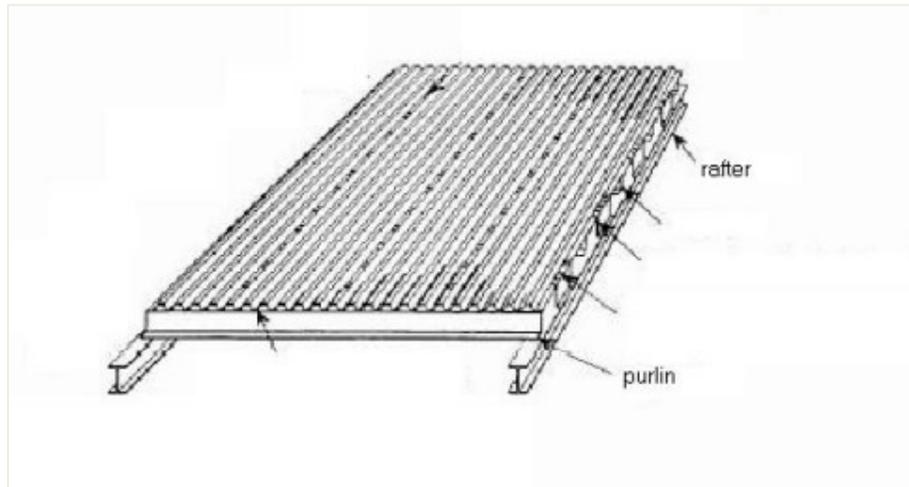


Raidisseurs

Les raidisseurs définissent les dimensions qui sont significatives uniquement pour le contrôle au cisaillement. Lorsqu'aucun raidisseur n'est défini, la valeur pour « a » est prise égale à la longueur de l'élément.



🚧 **Tôle profilée (diaphragme)**



Tôle profilée
✕

Nom	SH1
Bibliothèque tôles profilées	Tole1
Position Z	+ z
k	1 et 2 portées
Position de la tôle profilée	Positif
Position des boulons	Semelle supérieure
Pince boulons	br
Lf - distance entre portiques	3.000
Ld - longueur de tôle profilée	1.000
📐 Géométrie	
Définition de coord.	Rela
Position x1	0.000
Position x2	1.000
Origine	Depuis le départ

Les paramètres généraux sont :

- « Bibliothèque de tôles profilées » : type de tôle profilée défini.
- « k » : la valeur du coefficient k dépend du nombre de travées du diaphragme :
 - k = 2 pour une ou deux travées
 - k = 4 pour trois travées ou plus
- « Position de la tôle profilée » :

La position du diaphragme peut être ou bien positive ou bien négative.

Positive signifie que le diaphragme est assemblé d'une manière que la largeur est plus grande sur la partie supérieure.

Négative signifie que le diaphragme est assemblé d'une manière que la largeur est plus grande sur la partie inférieure.

- « Position des boulons » : les boulons peuvent être localisés ou bien sur la partie supérieure ou sur la partie inférieure du diaphragme.
- « Pincés boulons » : les boulons peuvent être ou bien :
 - Dans chaque nervure (c'est-à-dire « br »)
 - Dans chaque seconde nervure (c'est-à-dire « 2 br »)
- « Distance entre portiques » : la distance entre portiques.
- « Longueur de tôle profilée » : la longueur du diaphragme.

Les paramètres de géométrie sont :

- « Position x1 » : la valeur x1 spécifie le point de début de la tôle profilée sur la poutre.
- « Position x2 » : la valeur x2 spécifie le point de fin de la tôle profilée sur la poutre.
- « Définition de Coord. » : définit le système de coordonnées dans lequel la position x a été saisie.
- « Origine » : définit l'origine à partir de laquelle la position x est mesurée.

Chapitre 7: Contrôles ELU

7.1. Elancement aluminium

Dans les outils du processus, cliquer sur le poste de travail « Aluminium », puis sur « Élancement ». Via cette option, l'utilisateur peut demander la longueur système, le coefficient de flambement, la longueur de flambement, l'élancement relatif et l'imperfection en arc selon les deux axes locaux. De plus, la longueur de déversement et la longueur de flambement en torsion peuvent être affichées.

Données d'élancement										
Calcul linéaire										
Élément	Nom prof.	Partie	Nds dépl. y	Ly	ky	ly	Lam y	e0,y	lyz	I DEV
				[m]	[-]	[m]	[-]	[mm]		
			Nds dépl. z	Lz	kz	lz	Lam z	e0,z		
				[m]	[-]	[m]	[-]	[mm]		
B1	column A	1	Oui	3.000	1.13	3.386	56.37	10.0	5.500	5.500
			Non	5.500	1.00	5.500	196.13	18.3		
B1	column A	2	Oui	2.500	1.45	3.615	60.18	8.3	5.500	5.500
			Non	5.500	1.00	5.500	196.13	18.3		

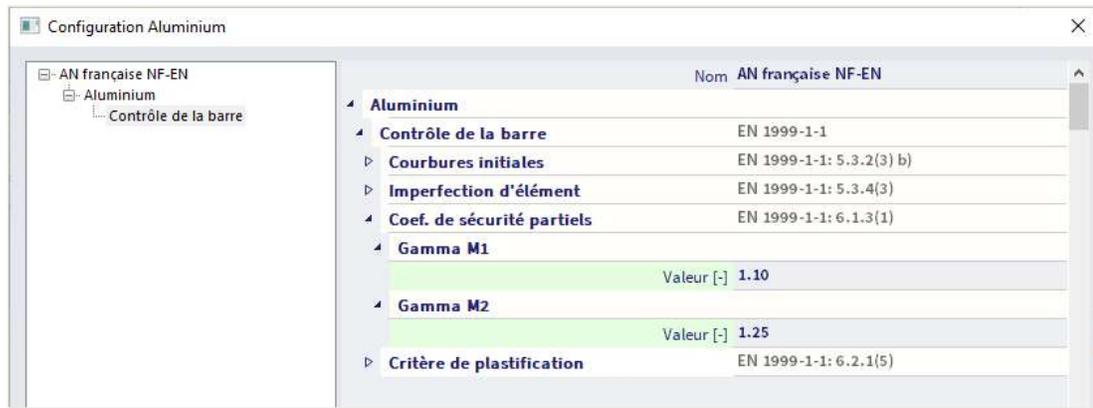
7.2. Contrôle de section

✚ Coefficients partiels de sécurité

Les coefficients partiels de sécurité peuvent être choisis dans l'annexe nationale. Les valeurs recommandées sont données dans le tableau 6.1 (Réf.[1]).

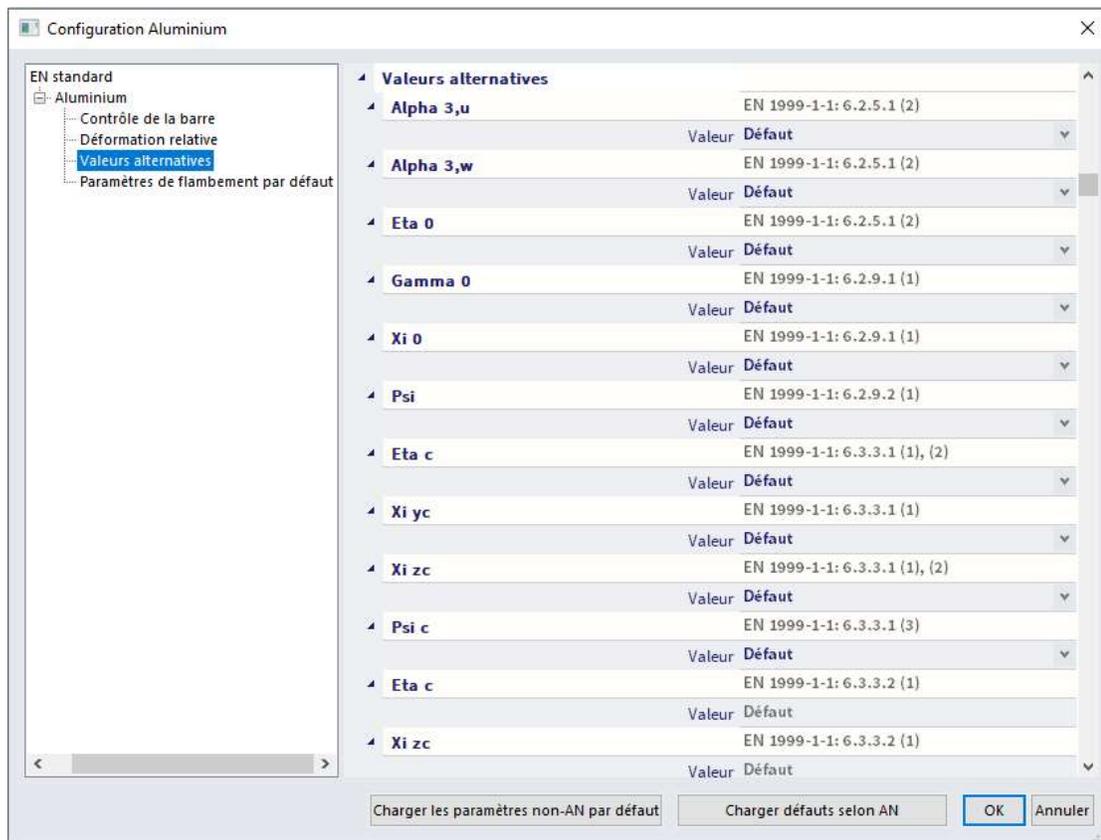
Résistance de sections quelque soit la classe	$\gamma_{M1} = 1,10$
Résistance de l'élément à l'instabilité évaluée par les contrôles	$\gamma_{M1} = 1,10$
Résistance à la rupture de sections en traction	$\gamma_{M2} = 1,25$

Par le menu « Fichier », « Paramètres du projet », et « Annexes nationales », « EN 1999 : conception de structures en aluminium », « EN 1999-1-1 « Règles de structure générales », l'utilisateur peut saisir les valeurs pour γ_{M1} et γ_{M2} .



Moments de flexion

Conformément à l'article 6.2.5.1 Réf.[1], les valeurs alternatives pour $\alpha_{3,u}$ et $\alpha_{3,w}$ peuvent être choisies. Dans SCIA Engineer, l'utilisateur peut saisir ces valeurs alternatives par la boîte de dialogue « Configuration Aluminium » du menu « Dimensionnement » / « Aluminium » (ou par les outils du processus, poste de travail « Aluminium »).



Cisaillement

La valeur de calcul de l'effort de cisaillement V_{Ed} à chaque section devrait satisfaire (Réf.[1]) :

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

Avec V_{Rd} , la résistance de cisaillement de calcul de la section.

Sections élancées et non-élancées

Les formules à utiliser dans le contrôle en cisaillement dépendent de l'élancement des parties de la section.

Pour chaque partie i , l'élancement β est calculé comme suit :

$$\beta_i = \left(\frac{h_w}{t_w} \right)_i = \left(\frac{x_{fin} - x_{déb}}{t} \right)_i$$

Avec :

x_{fin} position de fin de la plaque i
 $x_{déb}$ position de début de la plaque i
 t épaisseur de la plaque i

Pour chaque partie i , l'élancement β est alors comparé à la limite 39ε .

Avec :

$$\varepsilon = \sqrt{250/f_0}$$

Et f_0 en N/mm²

$\beta_i \leq 39\varepsilon \quad \Rightarrow \quad$ plaque non-élancée
 $\beta_i > 39\varepsilon \quad \Rightarrow \quad$ plaque élancée

Toutes les parties sont classées comme non-élancées

$$\beta_i \leq 39\varepsilon$$

Le contrôle en cisaillement devrait être vérifié en utilisant l'article 6.2.6 Réf.[1]

Toutes les parties sont classées comme élancées

$$\beta_i > 39\varepsilon$$

Le contrôle en cisaillement devrait être vérifié en utilisant l'article 6.5.5 Réf.[1]

Pour chaque partie i , la résistance en cisaillement $V_{Rd,i}$ est calculée.

Partie non-élancée :

La formule (6.88) Réf.[1] est utilisée avec les propriétés calculées de la forme réduite pour N+ ($\rho_{u,ZAT}$).

Pour V_y :

$$A_{net,y,i} = (x_{fin} - x_{déb})_i * \rho_{u,ZAT} * t_i * \cos^2 \alpha_i$$

Pour V_z :

$$A_{net,z,i} = (x_{fin} - x_{déb})_i * \rho_{u,ZAT} * t_i * \sin^2 \alpha_i$$

Avec :

- i le numéro (ID) de la plaque
- x_{fin} la position de fin de la plaque i
- $x_{déb}$ la position de début de la plaque i
- t l'épaisseur de la plaque i
- $\rho_{u,ZAT}$ le coefficient de réduction de la ZAT de la plaque i
- α l'angle de la plaque i par rapport à l'axe y-y principal

Partie élancée :

La formule (6.88) Réf.[1] est utilisée avec les propriétés calculées de la forme réduite pour N+ ($\rho_{u,ZA}$), de la même manière que pour une partie non-élancée => $V_{Rd,i,yield}$.

La formule (6.89) est utilisée avec la longueur a de l'élément ou la distance entre raidisseurs (pour les sections I ou U) => $V_{Rd,i,buckling}$.

Pour cette partie élancée, la résultante $V_{Rd,i}$ est prise égale au minimum de $V_{Rd,i,yield}$ et $V_{Rd,i,buckling}$.

Pour chaque partie i, la résistance en cisaillement $V_{Rd,i}$ est calculée. La résistance V_{Rd} de la section est pris égal à la somme des résistances $V_{Rd,i}$ de toutes les parties.

$$V_{Rd} = \sum_i V_{Rd,i}$$

NB : Pour une barre pleine, un tube rond et un tube creux, toutes les parties sont prises comme non-élancées par défaut et la formule (6.31) est appliquée.

Exemple : wsa_004.esa

Calculer le projet, contrôle aluminium, sortie détaillée.

Parties	Type	β	39 ϵ	Elancement	$A_{vy,i}$	$A_{vz,i}$	$V_{RD,y,yield,i}$	$V_{RD,z,yield,i}$
1	RUO	10	43,07	non	2,9	37,1	0,31	4
2	F							
3	I	29	43,07	non	53,9	4,1	5,8	0,45
					53,9	4,1	5,8	0,45
4	F							
5	I	100	43,07	oui	10,5	139,5	1,13	15
					4,6	61,5	0,5	6,61
					10,5	139,5	1,13	15
6	F							
7	I	31,5	43,07	non	58,5	4,5	6,3	0,48
					58,5	4,5	6,3	0,48
8	F							
9	RUO	9	43,07	non	2,6	33,4	0,28	3,6

De plus, pour la partie élancée 3 :

- $a/b = 6000/200 = 30$ avec $a = 6\text{m}$ et $b = 200\text{m}$ et $v_1 = 0,280$
- Somme ($V_{RD,y,yield,i}$) = 27,44kN
- Somme ($V_{RD,z,yield,i}$) = 46,08kN
- $V_{RD,y} = 0,26 + 0,69 + 6,49 + 0,22 + 0,89 + 0,22 + 11,39 + 0,69 + 0,23 = 21,09\text{kN}$
- $V_{RD,z} = 3,40 + 0,22 + 0,50 + 0,69 + 11,55 + 0,69 + 0,88 + 0,22 + 3,00 = 21,14\text{kN}$

Contrôle à l'effort tranchant pour V_y

Selon EN 1999-1-1 article 6.5.5 et formule (6.87)

ID Partie	β	$V_{y,Rd,elast}$ [kN]	$V_{y,Rd,flamb}$ [kN]	$V_{y,Rd,i}$ [kN]
1	8.50	0.26	-	0.26
2	2.12	0.69	-	0.69
3	26.00	6.49	-	6.49
4	2.12	0.22	-	0.22
5	97.00	2.98	0.89	0.89
6	2.12	0.22	-	0.22
7	28.50	11.39	-	11.39
8	2.12	0.69	-	0.69
9	7.50	0.23	-	0.23

Classification d'élancement		Elancé	
Portées	a	6.000	m
Résistance à l'effort tranchant	$V_{y,Rd}$	21.09	kN
Contrôle unité		0.00	-

Contrôle à l'effort tranchant pour V_z

Selon EN 1999-1-1 article 6.5.5 et formule (6.87)

ID Partie	β	$V_{z,Rd,elast}$ [kN]	$V_{z,Rd,flamb}$ [kN]	$V_{z,Rd,i}$ [kN]
1	8.50	3.40	-	3.40
2	2.12	0.22	-	0.22
3	26.00	0.50	-	0.50
4	2.12	0.69	-	0.69
5	97.00	38.77	11.55	11.55
6	2.12	0.69	-	0.69
7	28.50	0.88	-	0.88
8	2.12	0.22	-	0.22
9	7.50	3.00	-	3.00

Classification d'élancement		Elancé	
Portées	a	6.000	m
Résistance à l'effort tranchant	$V_{z,Rd}$	21.14	kN
Contrôle unité		0.02	-

Calcul de l'aire de cisaillement

Le calcul de l'aire de cisaillement est fonction du type de section.
Le calcul est effectué en utilisant la forme réduite pour $N+(\rho_{0,ZAT})$.

Pour les barres pleines et les tubes ronds

L'aire de cisaillement est calculé en utilisant l'article 6.2.6 et la formule (6.31) Réf.[1] :

$$A_v = \eta_v \cdot A_e$$

Avec :

- η_v 0,8 pour les sections pleines
0,6 pour les sections circulaires (creuses et pleines)
- A_e pris comme l'aire A calculée en utilisant la forme réduite pour N+ ($\rho_{0,ZAT}$)

Pour toutes les autres sections

Pour toutes les autres sections, l'aire de cisaillement est calculée en utilisant l'article 6.2.6 et la formule (6.30) Réf.[1].

Les adaptations suivantes sont utilisées pour rendre ces formules utilisables pour n'importe quelle forme initiale de section :

Pour V_y :

$$A_{vy} = \sum_{i=1}^n (x_{fin} - x_{déb}) * \rho_{0,ZAT} * t * \cos^2 \alpha$$

Pour V_z :

$$A_{vz} = \sum_{i=1}^n (x_{fin} - x_{déb}) * \rho_{0,ZAT} * t * \sin^2 \alpha$$

Avec :

- i le numéro (ID) de la plaque
- x_{fin} la position de fin de la plaque i
- $x_{déb}$ la position de début de la plaque i
- t l'épaisseur de la plaque i
- $\rho_{0,ZAT}$ le coefficient de réduction de la ZAT de la plaque i
- α l'angle de la plaque i par rapport à l'axe y-y principal

Si une section transversale est définie de telle sorte que l'aire de cisaillement A_v (A_{vy} ou A_{vz}) est nulle, alors A_v est pris égal à A, calculée à partir de la forme réduite pour N+ ($\rho_{0,ZAT}$).

NB : pour les sections sans forme initiale ou sections numériques, aucune de ces méthodes mentionnées ne peuvent être appliquées. Dans ce cas, la formule (6.29) est utilisée avec A_v pris égal à A_y ou A_z des propriétés de la section brute.

 **Torsion avec gauchissement**

Dans le cas où le gauchissement est pris en compte, le contrôle en section combinée est remplacé par un contrôle de contraintes élastiques incluant les contraintes de gauchissement.

$$\sigma_{tot,Ed} \leq \frac{f_0}{\gamma_{M1}}$$

$$\tau_{tot,Ed} \leq \frac{f_0}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

$$\sqrt{\sigma_{tot,Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{tot,Ed}^2} \leq \sqrt{C} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}}$$

$$\sigma_{tot,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{My,Ed} + \sigma_{Mz,Ed} + \sigma_{w,Ed}$$

$$\tau_{\text{tot,Ed}} = \tau_{V_y,Ed} + \tau_{V_z,Ed} + \tau_{t,Ed} + \tau_{w,Ed}$$

Avec :

f_0	résistance de contrôle à 0,2%
$\sigma_{\text{tot,Ed}}$	contrainte directe totale
$\tau_{\text{tot,Ed}}$	contrainte de cisaillement totale
γ_{M1}	coefficient de sécurité partiel pour la résistance des sections
C	constantes (par défaut 1, 2)
$\sigma_{N,Ed}$	contrainte directe due à l'effort normal sur la section effective significative
$\sigma_{M_y,Ed}$	contrainte directe due au moment de flexion autour de l'axe y sur la section effective significative
$\sigma_{M_z,Ed}$	contrainte directe due au moment de flexion autour de l'axe z sur la section effective significative
$\sigma_{w,Ed}$	contrainte directe due au gauchissement sur la section brute
$\tau_{V_y,Ed}$	contrainte de cisaillement due à l'effort tranchant dans la direction y sur la section brute
$\tau_{V_z,Ed}$	contrainte de cisaillement due à l'effort tranchant dans la direction z sur la section brute
$\tau_{t,Ed}$	contrainte de cisaillement due à la torsion uniforme (St. Venant) sur la section brute
$\tau_{w,Ed}$	contrainte de cisaillement due au gauchissement sur la section brute

La contrainte directe due au cisaillement est donnée par les références Réf.[3] 7.4.3.2.3, Réf.[4]. Une explication plus détaillée peut être trouvée en Réf.[20].

Flexion, cisaillement et effort normal

Conformément aux sections 6.2.9.1.(1) et 6.2.9.2.(1) Réf.[1], les valeurs alternatives pour γ_0 , η_0 , ε_0 et ψ peuvent être choisies. Dans SCIA Engineer, l'utilisateur peut saisir ces valeurs alternatives par la boîte de dialogue « Configuration Aluminium » et « Valeurs alternatives ».

Soudures localisées

Dans le cas de soudures transversales, l'extension de la ZAT est calculée comme spécifiée dans le paragraphe « Calcul des effets du coefficient de réduction ρ_{ZAT} » de la partie théorique de la norme Aluminium, et comparée à la plus petite largeur de la section.

Le coefficient de réduction ω_0 est alors calculé conformément à l'article 6.2.9.3.Réf.[1]. Lorsque la largeur d'un élément ne peut pas être déterminée (section numérique, tube ...), la formule (6.44) est appliquée.

NB : Comme l'extension de la ZAT est définie le long de l'élément, il est important de spécifier suffisamment de « sections sur l'élément moyen » dans la configuration du solveur lorsque des soudures sont utilisées.

NB : La formule (6.44) est limitée à un maximum de 1 de la même manière que la formule (6.64).

Réduction de cisaillement

Lorsque V_{Ed} dépasse 50% de V_{Rd} , les résistances de calcul en flexion et en effort normal sont réduites en utilisant la résistance élastique réduite comme spécifiée dans l'article 6.2.8 & 6.2.10 Réf.[1].

Pour V_y , le coefficient de réduction ρ_y est calculé.

Pour V_z , le coefficient de réduction ρ_z est calculé.

La résistance en flexion $M_{y,Rd}$ est réduite en utilisant ρ_z .

La résistance en flexion $M_{z,Rd}$ est réduite en utilisant ρ_y .

La résistance à l'effort normal N_{Rd} est réduite en utilisant le maximum de ρ_y et ρ_z .

Exemple : wsa_005.esa

Calculer le projet.

Sortie détaillée de la poutre B6, sous le contrôle aluminium sous la combinaison UGT.

Classification pour My- = 4

Contrôle de la poutre B6.

Contrôle combiné en flexion, effort normal et effort tranchant.

Contrôle combiné flexion, effort normal et effort tranchant

Selon EN 1999-1-1 article 6.2.8 & 6.2.9 et formule (6.40), (6.41)

Coefficient	η_0	1.00	
Coefficient	γ_0	1.00	
Coefficient	ξ_0	1.00	
Résistance à l'effort normal	N_{Rd}	1739.63	kN
Résistance en flexion réduite	$M_{y,V,Rd}$	342.94	kNm
Résistance en flexion réduite	$M_{z,V,Rd}$	31.08	kNm

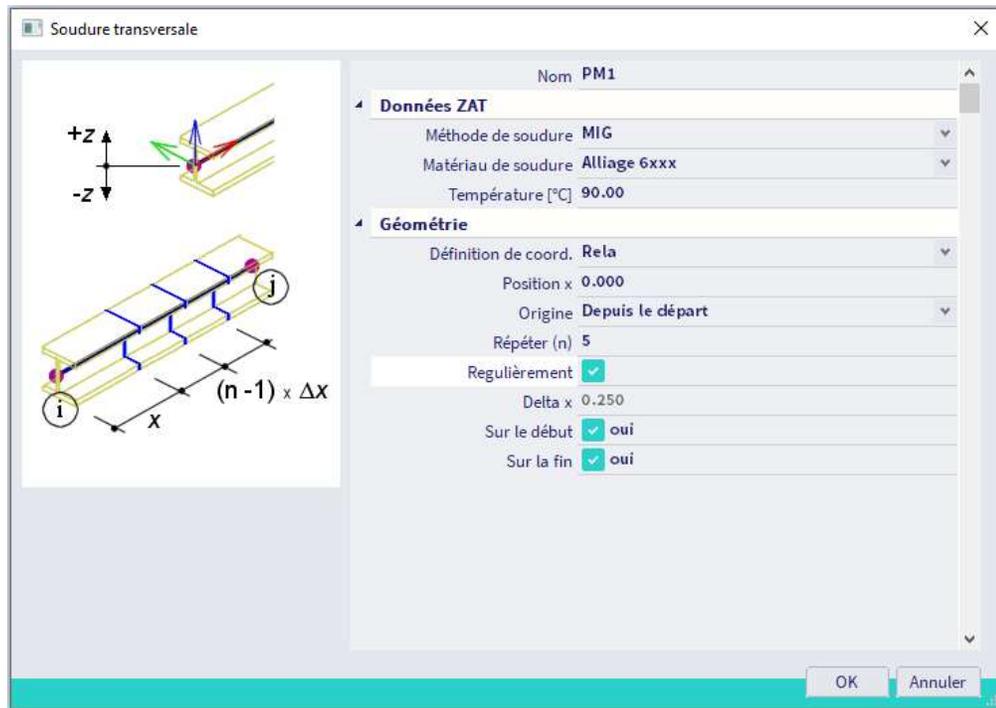
Contrôle unité (6.40) = 0.00 + 0.13 = 0.13 -

Contrôle unité (6.41) = 0.00 + 0.13 + 0.00 = 0.13 -

L'élément satisfait le contrôle en section.

Saisir 20 soudures transversales à distances régulières, du début à la fin de la poutre B6.

Soudure MIG, 90°C



Contrôle de la poutre B6.

Contrôle combiné flexion, effort normal et effort tranchant

Selon EN 1999-1-1 article 6.2.8 & 6.2.9 et formule (6.40), (6.41)

Coefficient	η_0	1.00	
Coefficient	γ_0	1.00	
Coefficient	ξ_0	1.00	
Résistance à l'effort normal	N_{Rd}	1184.90	kN
Résistance en flexion réduite	$M_{y,V,Rd}$	243.96	kNm
Résistance en flexion réduite	$M_{z,V,Rd}$	19.46	kNm

Contrôle unité (6.40) = $0.00 + 0.17 = 0.17$ -

Contrôle unité (6.41) = $0.00 + 0.17 + 0.00 = 0.17$ -

L'élément satisfait le contrôle en section.

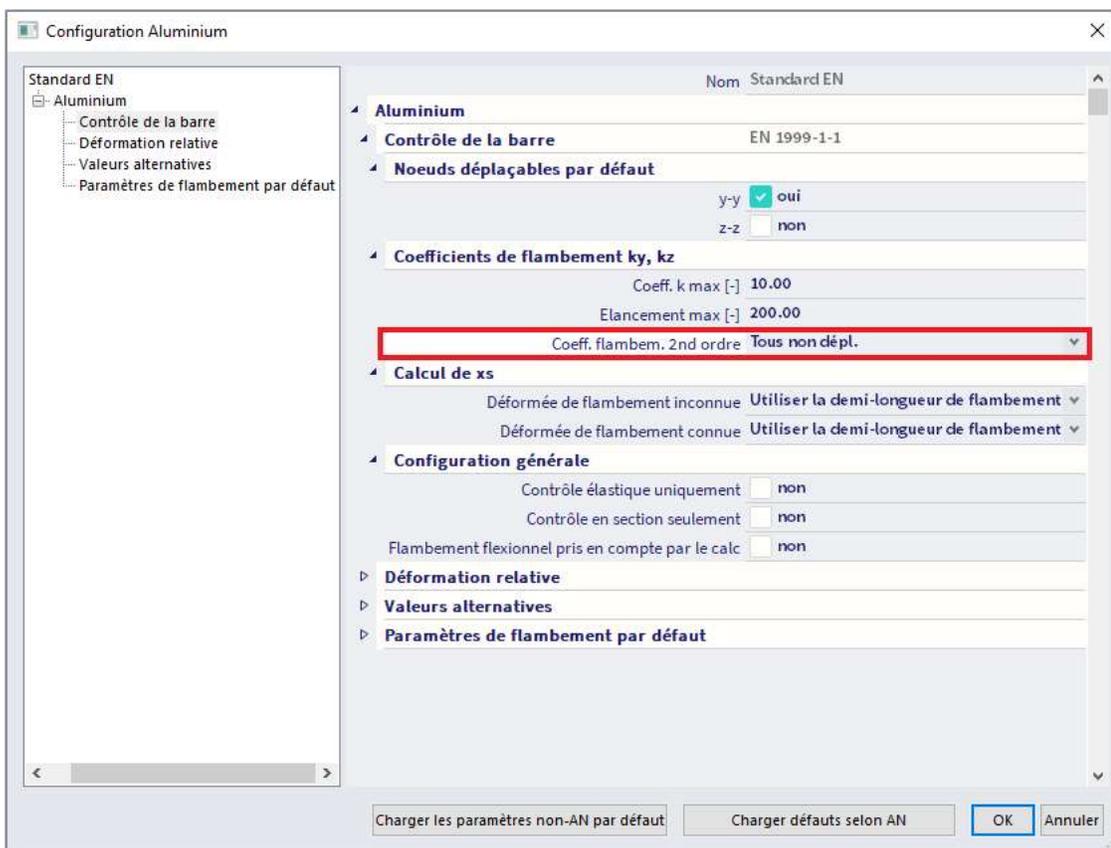
7.3. Contrôle en stabilité

Flambement flexionnel

Remarques générales

Les différentes longueurs système et types de déplacement doivent être introduits. Les valeurs par défaut peuvent être remplacées par les valeurs de l'utilisateur.

Pendant l'analyse non-linéaire, le type de déplacement peut être saisi par l'utilisateur. Ou bien il peut être saisi « Tous non dépl. » dans la boîte de dialogue « Configuration Aluminium ».



Coefficients de flambement

Formules générales

Pour le calcul des coefficients de flambement, des formules approximatives sont utilisées. Ces formules sont traitées dans les références [5], [6] et [7].

Les formules suivantes sont utilisées pour les coefficients de flambement (Réf.[7]) :

Pour une structure à nœuds non-déplaçables :

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

Pour une structure à nœuds déplaçables :

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

Avec :

L	Longueur système
E	Module d'Young
I	Moment d'inertie
C _i	Rigidité dans le nœud i
M _i	Moment dans le nœud i
φ _i	Rotation dans le 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 de manière approximative par les efforts internes et les déformations, calculés par les cas de charges qui génèrent des déformations, que l'on peut assimiler aux formes de flambement (voir aussi les références Réf.[8] pp 113 et Réf.[9] pp 112).

Les cas de charges suivants sont prise en compte :

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

L'approche utilisée donne de bons résultats pour les structures à portiques avec des assemblages de poutres perpendiculaires rigides ou semi-rigides. Pour les autres cas, l'utilisateur doit évaluer les coefficients de flambement qui sont présentés. Dans de tels cas, une approche plus raffinée (d'une analyse en stabilité) peut être appliquée.

Analyse en stabilité

Lorsque des données de flambement d'un élément en stabilité sont définies, l'effort de flambement critique N_{cr} pour un élément prismatique est calculé comme suit :

$$N_{cr} = \lambda \cdot N_{Ed}$$

En utilisant les formules d'Euler, le coefficient de flambement k peut être déterminé :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(k \cdot s)^2} \Rightarrow k = \frac{1}{s} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{N_{cr}}}$$

Avec :

- λ Coefficient de charge critique pour la combinaison de stabilité sélectionnée
- N_{Ed} Effort de calcul dans l'élément
- E Module d'Young
- I Moment d'inertie
- s Longueur de l'élément

Exemple : wsa_006.esa

Calculer le projet.

Sortie détaillée de la poutre B1, sous le contrôle aluminium sous la combinaison UGT.

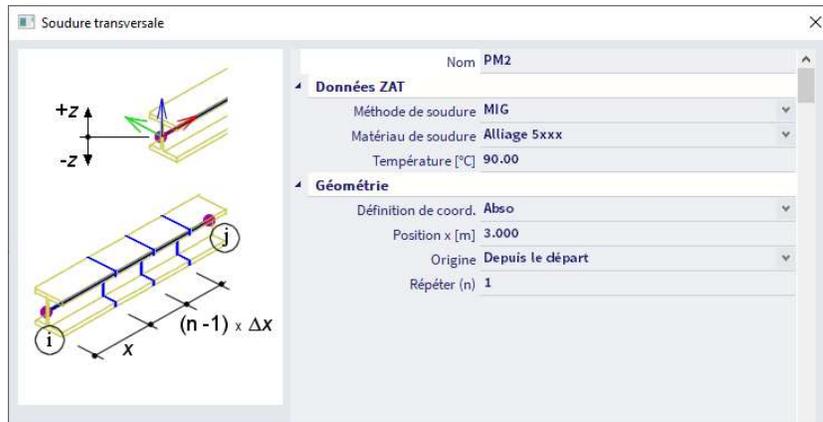
Contrôle critique à 3m.

Classification pour $N = 4$ et $M_y = 4$

Contrôle en flambement flexionnel.

Contrôle flambement flexionnel				
Selon EN 1999-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.48)				
Paramètres de section et de soudure				
Aire de la section efficace	A_{eff}	3.1590e-03	m ²	
Coefficient d'imperfection	α	0.20		
Elancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.10		
Paramètres de flambement flexionnel		y-y	z-z	
Noeuds déplaçables		Déplaçable	Non-déplaçable	
Longueur système	L	3.000	5.500	m
Coefficient de flambement	k	1.13	1.00	
Longueur de flambement	l_c	3.386	5.500	m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	787.33	65.05	kN
Elancement relatif	λ_{rel}	1.02	3.55	
Coef. de soudure	κ	1.00	1.00	
Coefficient de réduction	χ	0.64	0.07	
Distance du point d'inflexion	x_s	1.693	2.750	m
Coef. de position de section	ω_x	1.00	1.00	
Résistance au flambement (limite élastique)	$N_{o,fb,Rd}$	479.31	55.84	kN
Vérification du flambement flexionnel				
Résistance au flambement flexionnel	$N_{fb,Rd}$	55.84	kN	
Contrôle unité		0.38	-	

Saisir une soudure transversale sur poutre B1 à la position de 3m :



Sortie détaillée de la poutre B1, sous le contrôle aluminium sous la combinaison UGT.
 Contrôle critique à 3m.
 Classification pour N- = 4 et My- = 4
 Contrôle en flambement flexionnel.

Contrôle flambement flexionnel
 Selon EN 1999-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.48)

Paramètres de section et de soudure			
Aire de la section efficace	A_{eff}	1.9496e-03	m ²
Aire de la section efficace (soudure transv.)	$A_{u,eff}$	2.3011e-03	m ²
Coefficient d'imperfection	α	0.20	
Élancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.10	

Paramètres de flambement flexionnel		y-y		z-z	
		Déplaçable	Non-déplaçable		
Noeuds déplaçables		Déplaçable	Non-déplaçable		
Longueur système	L	3.000	5.500		m
Coefficient de flambement	k	1.13	1.00		
Longueur de flambement	l_c	3.386	5.500		m
Charge critique d'Euler	N_{cr}	787.33	65.05		kN
Élancement relatif	λ_{rel}	0.80	2.79		
Élancement relatif (soudure transv.)	$\lambda_{rel,zat}$	0.95	3.31		
Coef. de soudure	k	1.00	1.00		
Coefficient de réduction	χ	0.78	0.12		
Coefficient de réduction (soudure transv.)	χ_{zat}	0.69	0.09		
Distance du point d'inflexion	x_s	1.693	2.750		m
Coef. de position de section	ω_x	1.00	1.00		
Coef. de position de section (soudure transv.)	$\omega_{x,zat}$	1.00	1.00		
Résistance au flambement (limite élastique)	$N_{o,fb,Rd}$	359.41	54.84		kN
Résistance au flambement (soudure transv.)	$N_{u,fb,Rd}$	392.83	48.91		kN

Vérification du flambement flexionnel			
Résistance au flambement flexionnel	$N_{fb,Rd}$	48.91	kN
Contrôle unité		0.43	-

La différence entre les deux exemples se trouvent dans la valeur de $N_{b,Rd}$ avec et sans soudure.
 Autour de l'axe z :

$$N_{b,Rd,sans\ soudure} = 54,84\text{kN}$$

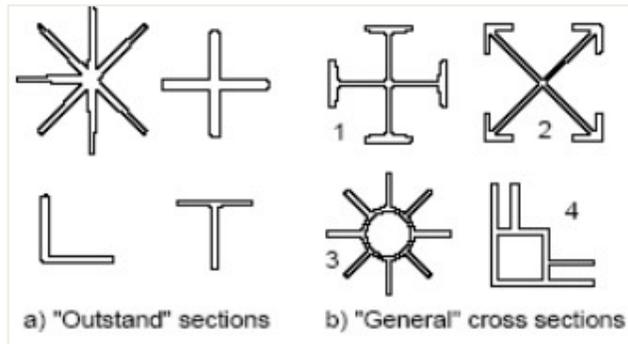
$$N_{b,Rd,avec\ soudure} = 48,91\text{kN}$$

Flambement en torsion

Si la section ne contient que des éléments de type F, SO, UO, alors on est dans le cas d'éléments entièrement composés de branches extérieures. Dans ce cas, A_{eff} est pris égal à A , calculé à partir de la forme réduite pour $N+(\rho_{0,ZAT})$ conformément au tableau 6.7 Réf.[1].

Dans tous les autres cas, la section est « Général ».

Dans ce cas, A_{eff} est pris égal à A , calculé à partir de la forme réduite pour $N-$.



NB : Le contrôle en flambement torsionnel (-flexionnel) est ignoré pour les sections conformes aux réglementations données dans l'article 6.3.1.4(1) Réf.[1].

La valeur de la charge critique élastique N_{cr} est pris égal à la plus petite des valeurs $N_{cr,T}$ (flambement torsionnel) et $N_{cr,TF}$ (flambement torsionnel-flexionnel).

Calcul de $N_{cr,T}$

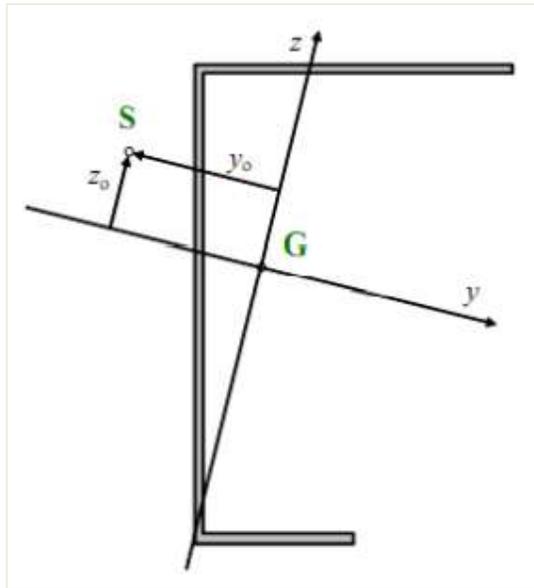
La charge critique élastique $N_{cr,T}$ est calculé conformément à Réf.[11] :

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

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

Avec :

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



Calcul de $N_{cr,TF}$

La charge critique élastique $N_{cr,TF}$ pour le flambement torsionnel flexionnel est calculée conformément à Réf.[11].

$N_{cr,TF}$ est pris égal au terme le plus petit de l'équation suivante :

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

Avec :

- $N_{cr,y}$ effort axial critique pour le flambement flexionnel selon l'axe yy
- $N_{cr,z}$ effort axial critique pour le flambement flexionnel selon l'axe zz
- $N_{cr,T}$ effort axial critique pour le flambement torsionnel

Exemple : wsa_007.esa

Calculer le projet.
 Sortie détaillé, sous le contrôle aluminium sous le cas de charges LC1.
 Contrôle critique à 3m.
 Classification pour $N = 4$, $M_y = 4$ et $M_z = 4$
 Contrôle en flambement torsionnel (-flexionnel).

Contrôle flambement torsionnel (-flexionnel)
Selon EN 1999-1-1 article 6.3.1.1 et formule (6.48)

Paramètres de flambement torsionnel(-flexionnel)			
Type de profil		Général	
Aire de la section efficace	A_{eff}	4.2967e+02	mm ²
Coefficient d'imperfection	α	0.35	
Elancement limite	$\lambda_{rel,0}$	0.40	
Longueur de flambement torsionnel	$l_{c,T}$	6.000	m
Charge axiale critique (flamb. tors.)	$N_{cr,T}$	14.99	kN
Charge axiale critique (flamb. tors. flex.)	$N_{cr,TF}$	4.86	kN
Charge axiale critique	N_{cr}	4.86	kN
Elancement relatif	$\lambda_{rel,T}$	4.26	
Coef. de soudure	K	1.00	
Coefficient de réduction	χ_T	0.05	
Distance du point d'inflexion	$x_{s,z}$	3.000	m
Coef. de position de section	$\omega_{x,z}$	1.00	
Résistance au flambement (limite élastique)	$N_{o,fb,Rd}$	4.10	kN

Vérification du flambement torsionnel(-flexionnel)			
Résistance au flambement torsionnel(-flexionnel)	$N_{fb,Rd}$	4.10	kN
Contrôle unité		2.44	-

Déversement

Le contrôle au déversement est vérifié en utilisant l'article 6.3.2.1 Réf.[1].

Pour le calcul du moment critique élastique M_{cr} , les méthodes suivantes sont disponibles :

- Formule générale (méthode standard)
- Solution des valeurs propres LTBII
- Saisie manuelle

NB : le contrôle au déversement est ignoré pour les sections circulaires creuses conformément à l'article 6.3.3 (1) Réf.[1].

Calcul de M_{cr} – Formule générale

Pour les sections I (symétriques et asymétriques) et les sections RHS (rectangulaires creuses), le moment critique élastique pour le déversement M_{cr} est donné par la formule générale F.2 annexe F Réf. [12]. Pour le calcul des coefficients de moment C1, C2 et C3, la référence est faite au paragraphe « Calcul des coefficients de moment pour le déversement » de la partie théorique sur la norme aluminium.

Pour les autres sections, le moment critique élastique pour le déversement M_{cr} est donné par :

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

Avec :

E	module d'Young
G	module de cisaillement
L	longueur de la poutre entre deux points de stabilisation / qui ont un blocage latéral (= l_{TB})
l_w	constante de gauchissement
I_t	constante de torsion
I_z	moment d'inertie sur l'axe faible

Voir aussi Réf.[13], partir 7 et en particulier partie 7.7 pour les sections en U.

Les sections de rail composées ont considérées comme des sections en I asymétriques équivalentes.

Lorsque des diaphragmes (tôles profilées) sont utilisées, la constante de torsion I_t est adaptée pour les sections en I symétriques / asymétriques, les sections en U, les sections en Z, les sections formées à froid Z, U, C.

Voir Réf.[14], chapitre 10.1.5, Réf.[15],3.5 et Réf.[16],3.3.4.

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

$$I_{t,id} = I_t + \text{vorh} C_{\theta} \frac{1}{\pi^2 G}$$

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

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

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

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

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

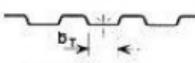
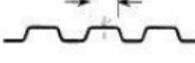
$$C_{\theta P,k} \approx \frac{3 \cdot E \cdot I_s}{(h - t)}$$

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

Avec :

l	longueur de déversement
G	module de cisaillement
$\text{vorh} C_{\theta}$	rigidité rotationnelle du diaphragme en cours
$C_{\theta M,k}$	rigidité rotationnelle du diaphragme
$C_{\theta A,k}$	rigidité rotationnelle de l'assemblage entre le diaphragme et la poutre
$C_{\theta P,k}$	rigidité rotationnelle due à la distorsion de la poutre

k	coefficient numérique = 2 pour 1 ou 2 travées du diaphragme = 4 pour 3 travées ou plus du diaphragme
EI_{eff}	rigidité flexionnelle par unité de largeur du diaphragme
s	espacement de la poutre
b_a	largeur de l'épaisseur de la poutre (en mm)
C_{100}	coefficient de rotation – voir tableau
h	hauteur de la poutre
t	épaisseur de la semelle de la poutre
s	épaisseur de l'âme de la poutre

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

Solution des valeurs propres LTBII

Pour un calcul de M_{cr} avec LTBII : la référence est faite au chapitre « LTBII : analyse au second ordre du déversement » du manuel théorique sur les contrôles aluminium.

Exemple : wsa_008.esa

Calculer le projet.
 Sortie détaillé, sous le contrôle aluminium sous le cas de charges LC1.
 Contrôle critique à 3m.
 Classification pour $N = 4$, $M_{y+} = 4$ et $M_{y-} = 4$
 Contrôle au déversement.

Longueur de déversement = 6m

Contrôle de déversement
Selon EN 1999-1-1 article 6.3.2.1 et formule (6.54)

Paramètres de déversement			
Module de section élastique	$W_{el,y}$	4.1599e+04	mm ³
Moment critique élastique	M_{cr}	0.83	kNm
Coefficient d'imperfection	α	0.92	
Coefficient d'imperfection	α_{LT}	0.20	
Elancement limite	$\lambda_{rel,0,LT}$	0.40	
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	2.40	
Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.16	
Distance du point d'inflexion	$x_{s,z}$	3.000	m
Coef. de position de section	$\omega_{x,LT}$	1.00	
Résistance au flambement (limite élastique)	$M_{o,b,Rd}$	0.70	kNm
Résistance au déversement	$M_{b,Rd}$	0.70	kNm
Contrôle unité		2.31	-

Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	$l_{c,LT}$	6.000	m
Infl. pos. des charges		pas d'influence	
Coefficient de correction	k	1.00	

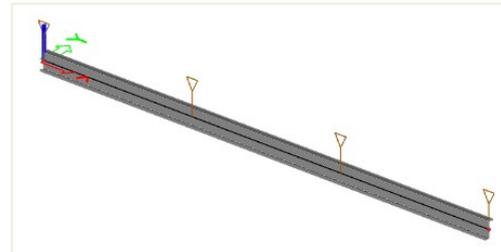
Saisir 4 appuis déversement régulièrement sur l'aile supérieure de la poutre.
Sortie détaillé, sous le contrôle aluminium sous le cas de charges LC1.

Contrôle critique à 3m.

Classification pour $N = 4$, $M_{y+} = 4$ et $M_{y-} = 4$

Contrôle au déversement.

Longueur de déversement = 2m



Contrôle de déversement
Selon EN 1999-1-1 article 6.3.2.1 et formule (6.54)

Paramètres de déversement			
Module de section élastique	$W_{el,y}$	4.1599e+04	mm ³
Moment critique élastique	M_{cr}	6.27	kNm
Coefficient d'imperfection	α	0.92	
Coefficient d'imperfection	α_{LT}	0.20	
Elancement limite	$\lambda_{rel,0,LT}$	0.40	
Elancement relatif	$\lambda_{rel,LT}$	0.87	
Coefficient de réduction	χ_{LT}	0.80	
Distance du point d'inflexion	$x_{s,z}$	3.000	m
Coef. de position de section	$\omega_{x,LT}$	1.00	
Résistance au flambement (limite élastique)	$M_{o,b,Rd}$	3.49	kNm
Résistance au déversement	$M_{b,Rd}$	3.49	kNm
Contrôle unité		0.46	-

Paramètres M_{cr}			
Longueur de déversement	$l_{c,LT}$	2.000	m
Infl. pos. des charges		pas d'influence	
Coefficient de correction	k	1.00	

Flexion et compression axiale

Flambement flexionnel

Conformément aux articles 6.3.3.1.(1), (2), (3) Ref.[1], des valeurs alternatives pour η_c , ε_{yc} , ε_{zc} , Ψ_c , peuvent être choisies. Dans SCIA Engineer, l'utilisateur peut saisir ces valeurs alternatives dans la boîte de dialogue « Configuration aluminium ».

Déversement

Eléments avec soudures localisées

Dans le cas où des soudures transversales sont définies, l'extension de la zone ZAT est calculée comme spécifiée dans le chapitre « Calcul du coefficient de réduction ρ_{ZAT} » et est comparée à la plus petite largeur de la section.

Les coefficients de réduction ω_0 est ω_x et ω_{xLT} , sont calculés conformément à l'article 6.3.3.3. Ref.[1].

Moments d'extrémité différents et/ou charges transversales

Si la section en question ne se trouve pas dans une zone ZAT, les coefficients de réduction ω_x et ω_{xLT} sont alors calculés conformément à l'article 6.3.3.5. Ref.[1].

Dans ce cas, ω_0 est pris égal à 1,00.

Calcul de X_s

La distance X_s est définie comme la distance de la section étudiée à un appui simple, ou bien au point d'inflexion de la courbe de flèche pour un flambement élastique sous effort normal seul.

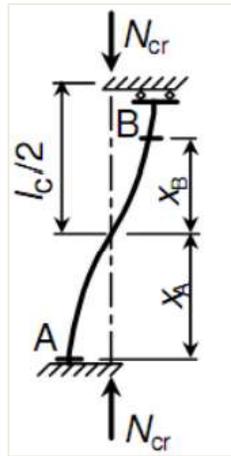
Par défaut, X_s est pris égale à la moitié de la longueur de flambement pour chaque section. Cela conduit à un dénominateur de 1,00 dans les formules des coefficients de réduction, conformément à Ref.[18] et 19].

En fonction de comment la forme de flambement est définie, une approche plus détaillée peut être utilisée pour le calcul de X_s .

Forme de flambement connu

La forme de flambement est supposée connue dans le cas où le coefficient de flambement est calculé selon la formule générale du chapitre « Calcul de coefficient de flambement – Formule générale ». L'hypothèse de base est que les déformations pour le cas de charge de flambement ont une affinité avec la forme de flambement.

Comme la forme de flambement (structure déformée) est connue, la distance de chaque section à un appui simple ou au point d'inflexion peut être calculée. X_s sera différent à chaque section. Un appui simple ou un point de changement de flèche sont dans ce cas pris comme les positions où le diagramme de moment pour le cas de charges de flambement atteint 0.



Note

Puisque pour une forme de flambement connue, X_s peut être différent dans chaque section, des résultats précis peuvent être obtenus en augmentant les nombres de sections sur l'élément dans la « Configuration du solveur » de SCIA Engineer.

Forme de flambement inconnu

Dans le cas où le coefficient de flambement n'est pas calculé selon la formule générale du chapitre « Calcul de coefficient de flambement – Formule générale », la forme de flambement est alors inconnue. C'est alors le cas d'une saisie manuelle ou le cas d'un calcul du coefficient par une analyse en stabilité.

Lorsque la forme de flambement n'est pas connue, X_s peut être calculé selon la formule (6.71) Ref.[1] :

$$\cos\left(\frac{X_s \pi}{l_c}\right) = \frac{(M_{Ed,1} - M_{Ed,2})}{\pi \cdot M_{Rd}} \cdot \frac{N_{Rd}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{1/(\chi - 1)} \quad \text{mais} \quad X_s \geq 0$$

Avec :

l_c	longueurs de flambement
$M_{Ed,1}$ et $M_{Ed,2}$	valeurs de calcul des moments d'extrémité à la longueur de référence de l'élément
N_{Ed}	valeurs de calcul d'effort normal de compression
M_{Rd}	résistance du moment de flexion
N_{Rd}	résistance de l'effort normal de compression
χ	coefficient de réduction pour le flambement flexionnel

Puisque la formule ne retourne qu'une seule valeur de X_s , cette valeur sera utilisée dans chaque section de l'élément.

L'application de la formule est toutefois limitée :

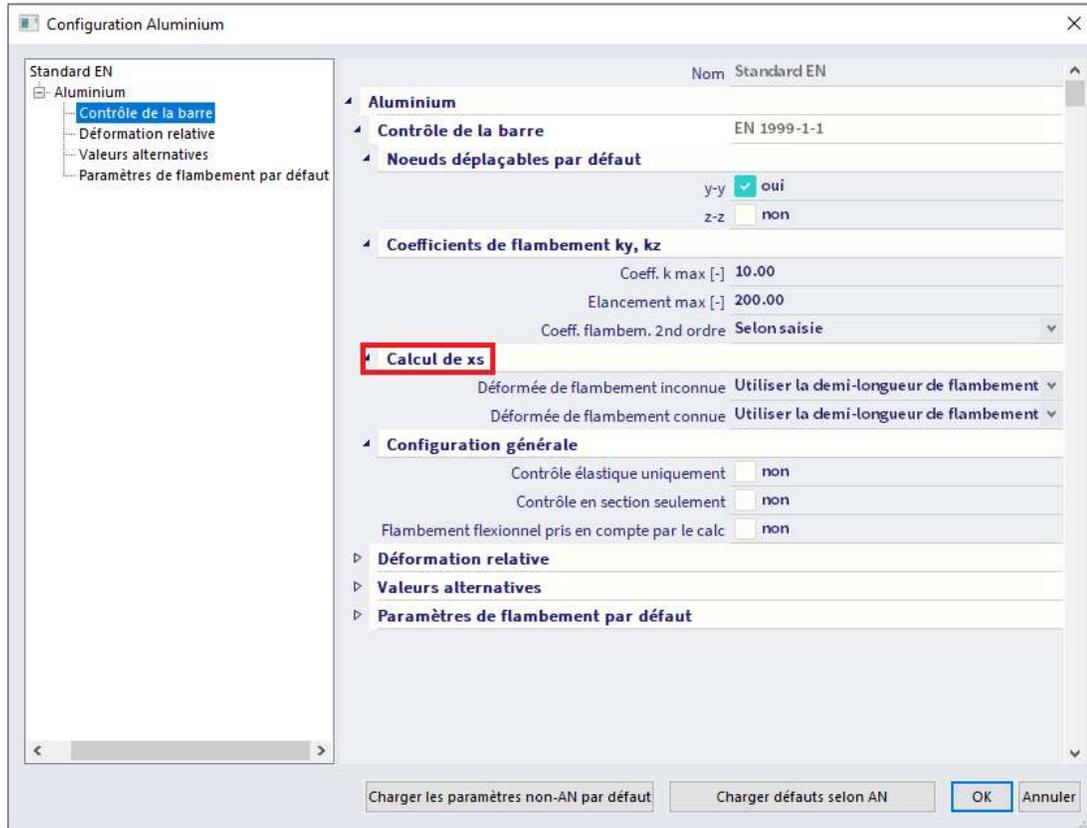
- La formule est valide si l'élément a un diagramme de moment linéaire.
- La partie gauche de l'équation étant un cosinus, la partie droite de l'équation doit renvoyer une valeur comprise entre -1,00 et +1,00.

Si l'une des deux limitations ci-dessus est avérée, alors la formule n'est pas appliquée et la distance X_s est prise égale à la moitié de la longueur de flambement pour chaque section.

Note :

La formule définie ci-dessus contient le coefficient π dans le dénominateur de la partie droite de l'équation. Ce coefficient a été omis par erreur dans la formule (6.71) de l'EN 1999-1-1 :2007.

L'utilisateur peut modifier le protocole de calcul pour X_s . Cela peut se faire dans les outils du processus, en cliquant sur le porte de travail « Aluminium », puis sur l'option « Données Élément Aluminium ». Ici, l'utilisateur peut choisir entre les formules évoquées ci-dessus ou bien l'utilisation de la moitié de la longueur de flambement pour X_s .



Exemple : wsa_009a.esa

- B1 : calcul par défaut des coefficients de flambement k_y et k_z selon les formules générales.
 - ⇒ La forme de flambement est connue pour les deux directions.
- B2 : calcul par défaut du coefficient de flambement k_y , saisie manuelle du coefficient k_z .
 - ⇒ La forme de flambement est connue pour yy , mais inconnue pour zz .
- B3 : calcul par défaut du coefficient de flambement k_y , saisie manuelle du coefficient k_z .
 - ⇒ La forme de flambement est connue pour yy , mais inconnue pour zz .

Le calcul de X_s pour la forme de flambement inconnue : selon la formule (6.71) Ref.[1].
 Le calcul de X_s pour la forme de flambement connue : selon le cas de charge de flambement.
 Le contrôle est effectué aux extrémités des poutres.

Résultats pour la poutre B1 :

- contrôle des moments M_y et M_z
- $x_{s,y} = x_{s,z} = 6,00\text{m}$

$$x_{s,y} = dx_{\text{inflexion}} - dx = 6.000[\text{m}] - 0.000[\text{m}] = 6.000[\text{m}]$$

$$x_{s,z} = \frac{l_{c,z}}{2} = \frac{4.200[\text{m}]}{2} = 2.100[\text{m}]$$

$$\omega_{x,y} = \frac{1}{\chi_y + (1 - \chi_y) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,y}}{l_{c,y}}\right)} = \frac{1}{0.48 + (1 - 0.48) \times \sin\left(\frac{\pi \times 6.000[\text{m}]}{12.014[\text{m}]}\right)} = 1.00$$

$$\omega_{x,z} = \frac{1}{\chi_z + (1 - \chi_z) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,z}}{l_{c,z}}\right)} = \frac{1}{0.73 + (1 - 0.73) \times \sin\left(\frac{\pi \times 2.100[\text{m}]}{4.200[\text{m}]}\right)} = 1.00$$

Résultats pour la poutre B2 :

- contrôle des moments M_y et M_z
- $x_{s,y} = 6,00\text{m}$ et $x_{s,z} = 1,50\text{m}$
- pour $x_{s,z}$, la forme de flambement est inconnue. La formule (6.71) sera donc utilisée, mais les limitations de cette formule ne sont pas respectées : du coup sera pris en compte la moitié de la longueur de flambement.
- la longueur de flambement = $k_z * L = 0,5 * 6,00\text{m} = 1,5\text{m}$

Configuration aluminium selon l'EN 1999

Annexe Nationale: 

Chercher Vu

Description	Symbole	Valeur	Dét
<tous>	<tous>	<tous>	
▲ Contrôle de la barre			
▲ Calcul de x_s			
Déformée de flambement inconnue		Utiliser la demi-longueur de flambement	Util
▶ Déformée de flambement connue		Selon cas de charge de flambement	Util

$$x_{s,y} = dx_{\text{inflexion}} - dx = 6.000[\text{m}] - 0.000[\text{m}] = 6.000[\text{m}]$$

$$x_{s,z} = \frac{l_{c,z}}{2} = \frac{3.000[\text{m}]}{2} = 1.500[\text{m}]$$

$$\omega_{x,y} = \frac{1}{\chi_y + (1 - \chi_y) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,y}}{l_{c,y}}\right)} = \frac{1}{0.48 + (1 - 0.48) \times \sin\left(\frac{\pi \times 6.000[\text{m}]}{12.014[\text{m}]}\right)} = 1.00$$

$$\omega_{x,z} = \frac{1}{\chi_z + (1 - \chi_z) \times \sin\left(\frac{\pi \times x_{s,z}}{l_{c,z}}\right)} = \frac{1}{0.82 + (1 - 0.82) \times \sin\left(\frac{\pi \times 1.500[\text{m}]}{3.000[\text{m}]}\right)} = 1.00$$

Résultats pour la poutre B3 :

- contrôle des moments M_y et M_z
- $x_{s,y} = 6,00\text{m}$ et $x_{s,z} = 1,071\text{m}$
- pour $x_{s,z}$, la forme de flambement est inconnue. La formule (6.71) sera donc utilisée.

Configuration aluminium selon l'EN 1999

Annexe Nationale: 

Chercher Vue

Description	Symbole	Valeur
<tous>	<tous>	<tous>
<ul style="list-style-type: none"> Contrôle de la barre <ul style="list-style-type: none"> Calcul de xs <ul style="list-style-type: none"> Déformée de flambement inconnue Déformée de flambement connue 		Selon la norme EN 1999-1-1 formule (6.71) Selon cas de charge de flambement

$$x_{s,y} = dx_{\text{inflexion}} - dx = 6.000[\text{m}] - 0.000[\text{m}] = 6.000[\text{m}]$$

$$x_{s,z} = \max \left\{ \frac{l_{c,z}}{\pi} \times \arccos \left[\frac{|M_{z,Ed,1}| - |M_{z,Ed,2}| \times N_{Rd}}{|N_{Ed}|} \times \frac{1}{\pi \times \left(\frac{1}{\chi_z} - 1 \right)} \right], 0 \right\}$$

$$= \max \left\{ \frac{3.000[\text{m}]}{\pi} \times \arccos \left[\frac{|10.00[\text{kNm}] - |0.00[\text{kNm}]| \times 1012.75[\text{kN}]}{|-1000.00[\text{kN}]|} \times \frac{1}{\pi \times \left(\frac{1}{0.82} - 1 \right)} \right], 0 \right\} = \max \{1.071[\text{m}], 0.000[\text{m}]\} = 1.071[\text{m}]$$

$$\omega_{x,y} = \frac{1}{\chi_y + (1 - \chi_y) \times \sin \left(\frac{\pi \times x_{s,y}}{l_{c,y}} \right)} = \frac{1}{0.48 + (1 - 0.48) \times \sin \left(\frac{\pi \times 6.000[\text{m}]}{12.014[\text{m}]} \right)} = 1.00$$

$$\omega_{x,z} = \frac{1}{\chi_z + (1 - \chi_z) \times \sin \left(\frac{\pi \times x_{s,z}}{l_{c,z}} \right)} = \frac{1}{0.82 + (1 - 0.82) \times \sin \left(\frac{\pi \times 1.071[\text{m}]}{3.000[\text{m}]} \right)} = 1.02$$

Exemple : wsa_009b.esa

B1 et B2: calcul par défaut des coefficients de flambement k_y et k_z conformément à la formule générale
 ⇒ La forme de flambement est connue pour les deux directions.
 Longueur des poutres : 4,00m

Le calcul de X_S pour la forme de flambement inconnue : utiliser la moitié de la longueur de flambement.
 Le calcul de X_S pour la forme de flambement connue : selon le cas de charge de flambement.

Résultats pour la poutre B1 :

- contrôle des moments pour LC1 = cas de charge de flambement = cas de charge identique à la formule générale
 - ⇒ Le point d'inflexion pour M_y se trouve à $dx = +-3,00\text{m}$
 - ⇒ Ainsi, la distance à partir de l'appui gauche dans la direction yy est de $+1\text{m}$: $x_{s,y} = 4,00\text{m} - 3,00\text{m} = 0,994\text{m}$
- $x_{s,z} = 4,00\text{m}$

Configuration aluminium selon l'EN 1999

Annexe Nationale: 

Chercher Vue

Description	Symbole	Valeur	Déf.
<tous>	<tous>	<tous>	
<ul style="list-style-type: none"> Contrôle de la barre <ul style="list-style-type: none"> Calcul de xs <ul style="list-style-type: none"> Déformée de flambement inconnue Déformée de flambement connue Configuration générale <ul style="list-style-type: none"> Contrôle élastique uniquement 		Utiliser la demi-longueur de flambement Selon cas de charge de flambement	Utili Utili

Contrôle en flexion composée avec compression

Selon EN 1999-1-1 article 6.3.3.1, 6.3.3.2 et formule (6.59) et (6.63)

Paramètres de flambement flexionnel			
Coefficient de réduction	χ_y	1.00	
Coefficient de réduction	χ_z	1.00	
Exposant	ξ_{yc}	0.80	
Exposant	ξ_{zc}	0.80	

Paramètres de flambement flexionnel			
Résistance au flambement flexionnel	$N_{y,fb,Rd}$	323.54	kN
Résistance au flambement flexionnel	$N_{z,fb,Rd}$	14.13	kN
Résistance flexionnelle	$M_{y,Rd}$	44.28	kNm
Résistance flexionnelle	$M_{z,Rd}$	6.26	kNm

Contrôle unité (6.59) = 0.00 + 0.04 = 0.04 -

Contrôle unité (6.59*) = 0.00 + 1.28 = **1.28** -

Paramètres de déversement			
Coefficient de réduction	$\chi_{z,LT}$	1.00	
Exposant	$\xi_{zc,LT}$	0.80	
Exposant	$\eta_{c,LT}$	0.80	
Exposant	γ_c	1.00	
Résistance au déversement	$M_{b,Rd}$	8.22	kNm
Résistance au flambement flexionnel	$N_{z,b,Rd}$	14.13	kN

$$x_{s,z} = dx - dx_{inflexion} = 4.000[m] - 0.000[m] = 4.000[m]$$

 **Voilement**

La vérification du voilement est effectuée via les articles 6.7.4 & 6.7.6 Ref.[1].

La distinction est faite entre deux cas séparés :

- Aucun raidisseur n'est défini, ou bien des raidisseurs sont saisis uniquement aux extrémités de l'élément.
- Toute autre définition de raidisseurs (aux positions intermédiaires, aux positions intermédiaires et d'extrémité, ...)

Le premier cas est vérifié selon l'article 6.7.4.1 Ref.[1]. Le deuxième cas est vérifié selon l'article 6.7.4.2 Ref.[1].

Note : Pour le voilement, seuls les raidisseurs transversaux sont pris en compte. Les raidisseurs longitudinaux ne le sont pas. Dans tous cas, les poteaux d'extrémités sont supposés être rigides.

Poutres métalliques de dalle avec raidisseurs aux appuis

Aucun raidisseur n'est défini, ou bien des raidisseurs sont saisis uniquement aux extrémités de l'élément. La vérification est faite selon l'article 6.7.4.1 Ref.[1].

Le contrôle est effectué lorsque la condition ci-dessous est remplie :

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{2,37}{\eta} \sqrt{\frac{E}{f_0}}$$

Avec :

h_w	largeur de l'âme
t_w	épaisseur de l'âme
η	coefficient pour la résistance en plasticité au flambement en cisaillement
E	module d'Young
f_0	0,2% de la résistance élastique

La résistance d'effort tranchant de calcul V_{Rd} au voilement comprend une seule partie : la contribution de l'âme $V_{w,Rd}$.

L'élanement λ_w est calculé comme suit :

$$\lambda_w = 0,35 \cdot \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}}$$

En utilisant l'élanement λ_w , le coefficient de voilement ρ_v est obtenu depuis le tableau suivant :

λ_w	ρ_v pour un raidisseur rigide
$\lambda_w \leq \frac{0,83}{\eta}$	η
$\frac{0,83}{\eta} \leq \lambda_w \leq 0,937$	$\frac{0,83}{\lambda_w}$
$0,937 \leq \lambda_w$	$\frac{2,3}{1,66 + \lambda_w}$

Dans ce tableau, la valeur de η est pris comme suit :

$$\eta = 0,7 + 0,35 \cdot f_{uw} \cdot l \cdot f_{0w}$$

Mais :

$$\eta \leq 1,2$$

Avec :

- f_{uw} résistance ultime pour le matériau de l'âme
- f_{0w} résistance élastique pour le matériau de l'âme

La contribution de l'âme $V_{w,Rd}$ peut alors être calculée comme suit :

$$V_{w,Rd} = \rho_v \cdot t_w \cdot h_w \cdot \frac{f_0}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

Pour les interactions, voir le paragraphe ci-après « Interaction ».

Poutres métalliques de dalle avec raidisseurs d'âme intermédiaires

Il s'agit de toute autre définition de raidisseurs (aux positions intermédiaires, aux positions intermédiaires et d'extrémité, ...). La vérification est faite selon l'article 6.7.4.2 Réf.[1].

Le contrôle est effectué lorsque la condition ci-dessous est remplie :

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{1,02}{\eta} \sqrt{\frac{k_T \cdot E}{f_0}}$$

Avec :

- h_w largeur de l'âme
- t_w épaisseur de l'âme
- η coefficient pour la résistance en plasticité au voilement
- k_T coefficient de voilement pour l'âme
- E module d'Young
- f₀ 0,2% de la résistance élastique

La résistance d'effort tranchant de calcul V_{Rd} au voilement comprend deux parties: la contribution de l'âme V_{w,Rd} et la contribution des ailes V_{f,Rd}.

Contribution de l'âme

En utilisant la distance a entre les raidisseurs et la largeur de l'âme h_w, le coefficient de flambement en cisaillement k_T peut être calculé comme suit :

$$k_T = 5,34 + 4,00 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \quad \text{si} \quad \frac{a}{h_w} \geq 1$$

$$k_T = 4,00 + 5,34 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \quad \text{si} \quad \frac{a}{h_w} < 1$$

La valeur de k_T peut maintenant être utilisé pour calculer l'élanement λ_w.

$$\lambda_w = \frac{0,81}{\sqrt{k_T}} \cdot \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}}$$

En utilisant l'élanement λ_w, le coefficient de flambement en cisaillement ρ_v est obtenu depuis le tableau suivant :

λ _w	ρ _v pour un raidisseur rigide
λ _w ≤ $\frac{0,83}{\eta}$	η
$\frac{0,83}{\eta} \leq \lambda_w \leq 0,937$	$\frac{0,83}{\lambda_w}$
0,937 ≤ λ _w	$\frac{2,3}{1,66 + \lambda_w}$

Dans ce tableau, la valeur de η est pris comme suit :

$$\eta = 0,7 + 0,35 \cdot f_{uw} \cdot l \cdot f_{0w}$$

Mais :

$$\eta \leq 1,2$$

Avec :

- f_{uw} résistance ultime pour le matériau de l'âme
- f_{0w} résistance élastique pour le matériau de l'âme

La contribution de l'âme $V_{w,Rd}$ peut alors être calculée comme suit :

$$V_{w,Rd} = \rho_v \cdot t_w \cdot h_w \cdot \frac{f_0}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

Contribution des ailes

Tout d'abord, la résistance de calcul du moment de la section $M_{f,Rd}$ en considérant uniquement les ailes est calculée.

Quand $M_{Ed} \geq M_{f,Rd}$, alors $V_{f,Rd} = 0$.

Quand $M_{Ed} < M_{f,Rd}$, alors $V_{f,Rd}$ est calculée comme suit :

$$V_{f,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{of}}{c \cdot \gamma_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

Avec : b_f et t_f la largeur et l'épaisseur de l'aile conduisant à la résistance la plus basse.

$$b_f \leq 15 \cdot t_f \quad \text{de chaque côté de l'âme}$$

$$c = a \cdot \left(0,08 + \frac{4,4 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{of}}{t_w \cdot b_w^2 \cdot f_{0w}} \right)$$

Avec :

- f_{of} résistance ultime pour le matériau de l'âme
- f_{0w} résistance élastique pour le matériau de l'âme

Si un effort normal N_{Ed} est présent, la valeur de $M_{f,Rd}$ est réduite par le coefficient suivant :

$$\left(1 - \left(\frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2}) \cdot \frac{f_{of}}{\gamma_{M1}}} \right) \right)$$

Avec : A_{f1} et A_{f2} les sections des ailes supérieures et inférieures.

La résistance de calcul d'effort tranchant V_{Rd} est alors calculée comme suit :

$$V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd}$$

Pour les interactions, voir le paragraphe ci-après « Interaction ».

Interaction

Si nécessaire, pour les deux cas ci-dessus, l'interaction entre l'effort de cisaillement, le moment fléchissant et l'effort normal est vérifiée conformément à l'article 6.7.6.1 Ref.[1].

Si $M_{Ed} > M_{f,Rd}$, les deux expressions suivantes sont vérifiées :

$$\frac{M_{Ed} + M_{f,Rd}}{2 \cdot M_{pl,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \cdot \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \leq 1,00$$

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

Avec :

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

- $M_{f,Rd}$ la résistance de calcul du moment de la section en prenant en compte uniquement les ailes
- $M_{pl,Rd}$ la résistance de calcul du moment de flexion

Si un effort normal N_{Ed} est également appliqué, alors $M_{pl,Rd}$ est remplacé par la résistance du moment plastique réduit $M_{N,Rd}$ donnée par :

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left(1 - \left(\frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2}) \cdot \frac{f_{0f}}{\gamma_{M1}}}\right)^2\right)$$

Avec : A_{f1} et A_{f2} les sections des ailes supérieures et inférieures.

Exemple : wsa_010b.esa

B1, B2 et B3 sont chargées par une charge linéaire de 10kN/m.
 B4 est chargée par une charge linéaire de 10kN/m et un effort normal de compression de 1200kN.

- B1 : aucun raidisseur
- B2 : raidisseurs aux extrémités
- B3 : raidisseurs aux extrémités et en intérieur
- B4 : raidisseurs aux extrémités et en intérieur

Saisie des résultats aux sections de début de poutres.

Résultats pour la poutre B1 :

- En utilisant la formule (6.122) et (6.147, Interaction)
- $V_{Rd} = V_{w,Rd} = 617,31\text{kN}$
- $UC = 0,05$

Contrôle voilement

Selon EN 1999-1-1 article 6.7.4.1, 6.7.6.1 et formule (6.122), (6.147)

Paramètres de voilement			
âme		non raidie	
Hauteur d'âme	h_w	976	mm
Épaisseur d'âme	t_w	12	mm
Épaisseur de semelle	t_f	12	mm
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Paramètre d'élanement	λ_w	1.20	
Coefficient	ρ_v	0.80	

Contrôle du voilement			
Élanement âme	h_w/t_w	81.33	
Élanement limite de l'âme	h_w/t_w limite	46.74	
Résistance à l'effort tranchant (âme)	$V_{w,Rd}$	617.31	kN
Contrôle unité (6.122)		0.05	-

Résultats pour la poutre B2 :

- Raidisseurs aux extrémités, idem comme les résultats pour B1
- En utilisant la formule (6.122) et (6.147, Interaction)
- $V_{Rd} = V_{w,Rd} = 617,31\text{kN}$
- UC = 0,05

Résultats pour la poutre B3 :

- Raidisseurs aux extrémités et en intérieur
- a = distance entre raidisseurs = 1,5m
- En utilisant la formule (6.124) et (6.147, Interaction)
- $V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd} = 652,21\text{kN} + 33,87\text{kN} = 686,08\text{kN}$
- UC = 0,04

Contrôle voilement

Selon EN 1999-1-1 article 6.7.4.2, 6.7.6.1 et formule (6.124), (6.147)

Paramètres de voilement			
âme		raidie	
Longueur du panneau d'âme	a	1.500	m
Hauteur d'âme	h_w	976	mm
Épaisseur d'âme	t_w	12	mm
Épaisseur de semelle	t_f	12	mm
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Coefficient de voilement	k_T	7.03	
Paramètre d'élanement	λ_w	1.05	
Coefficient	ρ_v	0.85	
Coefficient de semelle	c	145	mm

Contrôle du voilement			
Élanement âme	h_w/t_w	81.33	
Élanement limite de l'âme	h_w/t_w limite	53.35	
Résistance à l'effort tranchant (âme)	$V_{w,Rd}$	652.21	kN
Résistance à l'effort tranchant (semelles)	$V_{f,Rd}$	33.87	kN
Résistance à l'effort tranchant	$V_{z,Rd}$	686.08	kN
Contrôle unité (6.124)		0.04	-

Résultats pour la poutre B4 :

- Raidisseurs aux extrémités et en intérieur (+ effort normal supplémentaire)
- a = distance entre raidisseurs = 1,5m
- En utilisant la formule (6.124) et (6.147, Interaction)
- Un effort normal existe, $M_{f,Rd}$ doit donc être réduit.
- $M_{Ed} > M_{f,Rd} \Rightarrow$ la contribution en cisaillement des ailes ne devrait pas être prise en compte.
- $V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd} = 652,21\text{kN} + 0\text{kN} = 652,21\text{kN}$
- UC = 0,05 (6.124)
- UC = 999 (6.147 courbe (2))
- UC = 0,20 (6.147 courbe (3))

Contrôle voilement			
Selon EN 1999-1-1 article 6.7.4.2, 6.7.6.1 et formule (6.124), (6.147)			
Paramètres de voilement			
âme		raidie	
Longueur du panneau d'âme	a	1.500	m
Hauteur d'âme	h_w	976	mm
Épaisseur d'âme	t_w	12	mm
Épaisseur de semelle	t_f	12	mm
Coefficient de correction pour le cisaillement	η	1.20	
Coefficient de voilement	k_r	7.03	
Paramètre d'élanement	λ_w	1.05	
Coefficient	ρ_v	0.85	
Distance entre les semelles	h_f	988	mm
Aire de la semelle supérieure	A_{f1}	3.6000e+03	mm ²
Aire de la semelle inférieure	A_{f2}	3.6000e+03	mm ²
Contrôle du voilement			
Élanement âme	h_w/t_w	81.33	
Élanement limite de l'âme	h_w/t_w limite	53.35	
Résistance à l'effort tranchant (âme)	$V_{w,Rd}$	652.21	kN
Résistance à l'effort tranchant (semelles)	$V_{f,Rd}$	0.00	kN
Résistance à l'effort tranchant	$V_{z,Rd}$	652.21	kN
Contrôle unité (6.124)		0.05	-
Vérification de l'interaction du voilement			
Moment résistant (semelles)	$M_{f,Rd}$	0.00	kNm
Moment résistant plastique	$M_{pl,y,Rd}$	728.92	kNm
Résistance en flexion réduite	$M_{y,N,Rd}$	-839.07	kNm
Résistance en flexion (limite élastique)	$M_{o,y,Rd}$	492.16	kNm
Contrôle unité (6.147 courbe 3)		0.20	-
Contrôle unité (6.147 courbe 2) = 999.00 -			
Avertissement: Le contrôle de voilement ne peut pas être effectué en raison d'un effort normal extrême N_{Ed} . Cet élément ne satisfait PAS le contrôle de stabilité !			

Chapitre 8: Références

- 1] Eurocode 9
Design of aluminium structures
Part 1 - 1 : General structural rules
EN 1999-1-1:2007
- [2] TALAT Lecture 2301
Design of members
European Aluminium Association
T. Höglund, 1999.
- [3] Stahl im Hochbau
14. Auflage Band I/ Teil 2
Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1986
- [4] Kaltprofile
3. Auflage
Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1982
- [5] Handleiding moduul STACO VGI
Staalbouwkundig Genootschap
Staalcentrum Nederland
5684/82
- [6] Newmark N.M. A simple approximate formula for effective end-fixity of columns
J.Aero.Sc. Vol.16 Feb.1949 pp.116
- [7] Stabiliteit voor de staalconstructeur
uitgave Staalbouwkundig Genootschap
- [8] Rapportnr. BI-87-20/63.4.3360
Controleregels voor lijnvormige constructie-elementen
IBBC Maart 1987
- [9] Staalconstructies TGB 1990
Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies
NEN 6770, december 1991
- [10] DIN18800 Teil 2
Stahlbauten : Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken
November 1990
- [11] SN001a-EN-EU
NCCI: Critical axial load for torsional and flexural torsional buckling modes
Access Steel, 2006
www.access-steel.com
- [12] Eurocode 3
Design of steel structures
Part 1 - 1 : General rules and rules for buildings
ENV 1993-1-1:1992

- [13] R. Maquoi Advanced Training – Aluminium Code Check 80
ELEMENTS DE CONSTRUCTIONS METALLIQUE
Ulg , Faculté des Sciences Appliquées, 1988

- [14] 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

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

- [16] Beuth-Kommentare
Stahlbauten
Erläuterungen zu DIN 18 800 Teil 1 bis Teil 4, 1.Auflage
Beuth Verlag, Berlin-Köln 1993

- [17] Staalconstructies TGB 1990
Stabiliteit
NEN 6771 – 1991

- [18] A Gerhsi, R. Landolfo, F.M. Mazzolani (2002)
Design of Metallic cold formed thin-walled members
Spon Press, London, UK

- [19] G. Valtinat (2003)
Aluminium im Konstruktiven Ingenieurbau
Ernst & Sohn, Berlin, Germany

- [20] Aluminium Code Check EN 1999-1-1, Theoretical Background