



WP N°: 3
WP Title: eLectures: Interactive electronic lectures
Deliverable N°: D3.1
Deliverable Title : Steel decks with outwards stiffeners
Deliverable Date: 30th of June 2018

The GRISPE PLUS project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under grant agreement N° 754092"		
Author(s)		
<i>Sokol Palisson Consultants, Anna Palisson</i>		
Drafting history		
<i>FINAL- DATE: 31st of June</i>		
Dissemination Level		
<i>PU</i>	<i>Public-Open</i>	
<i>PP</i>	<i>Restricted to the Commission Services, the Coal and Steel Technical Groups and the European Committee for Standardisation (CEN)</i>	
<i>RE</i>	<i>Restricted to a group specified by the Beneficiaries</i>	
<i>CO</i>	<i>Confidential, only for Beneficiaries (including the Commission services)</i>	

D3.1 STEEL DECK WITH OUTWARDS STIFFENERS

RFCS funded – agreement N° 754092

Disclaimer notice and EU acknowledgement of support

Disclaimer notice

By making use of any information or content in this manual (Part 1 and Part 2) you agree to the following:

No warranties

All the information or content provided in this manual is provided “as is” and with no warranties. No express or implies warranties of any type, including for example implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, are made with respect to the information or content, or any use of the information or content in this manual.

The authors make no representations or extend no warranties of any type as to the completeness, accuracy, reliability, suitability or timeliness of any information or content in this manual.

Disclaimer of liability

This manual is for informational purposes only. It is your responsibility to independently determine whether to perform, use or adopt any of the information or content in this manual.

The authors specifically disclaim liability for incidental or consequential damages and assume no responsibility or liability for any loss or damage suffered by any person as a result of the use or misuse of any of the information or content in this manual.

The authors will not be liable to you for any loss or damage including without limitation direct, indirect, special or consequential loss or damage, or any loss or damage whatsoever arising from loss of data or loss of business, production, revenue, income, profits, commercial opportunities, reputation or goodwill, arising out of, or in connection with, the use of the information or content in this manual.

The authors do not represent, warrant, undertake or guarantee that the use of the information or content in this manual will lead to any particular outcome or results.

Reasonableness

By using this manual, you agree that the exclusions and limitations of liability set out in this disclaimer are reasonable. If you do not think they are reasonable, you must not use this manual.

Severability

If any part of this disclaimer is declared unenforceable or invalid, the remainder will continue to be valid and enforceable.

"The information and views set out in this manual (Part 1 and Part 2) are those of the author(s) and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union. Neither the European Union and bodies nor any person acting on their behalf may be held responsible for the use which may be made of the information or views contained therein"

EU acknowledgement of support

The GRISPE project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under grant agreement No75 4092

PARTIE1: MANUEL DE CALCUL POUR LES PLAQUES NERVUREES AVEC RAIDISSEURS EXTERIEURS

RESUME

L'objectif de ce manuel de calcul est de présenter une nouvelle méthode analytique de dimensionnement des plaques nervurées avec raidisseurs extérieurs, développée durant le projet Européen GRISPE.

Ce manuel est basé sur les principes des Eurocodes en général et plus spécifiquement sur ceux des normes EN 1993-1-3 et EN 1993-1-5.

Cette nouvelle méthode analytique de dimensionnement des plaques nervurées avec raidisseurs extérieurs est basée sur des essais réalisés dans le cadre du projet Européen GRISPE (2013-2016).

Le background de cette méthode est décrit dans l'Annexe 1.

Le chapitre 1 détaille les types de profils concernés, l'état de l'art, les principaux résultats de recherche de GRISPE ainsi que les exigences et règles générales de dimensionnement.

Le chapitre 2 présente les considérations préalables qui doivent être prises en compte lors des phases de pré-dimensionnement incluant en particulier la vérification des champs d'application de la nouvelle méthode de calcul.

Le chapitre 3 fournit les exigences technologiques de base.

Le chapitre 4 énumère les propriétés des matériaux des profils.

Le chapitre 5 indique la détermination des actions et leurs combinaisons.

Le chapitre 6 explique la nouvelle méthode de calcul.

Le chapitre 7 dresse la liste des considérations spécifiques de dimensionnement non couvertes par le présent manuel.

Le chapitre 8 fournit des exemples pratiques d'application de la nouvelle méthode de calcul.

Une Annexe est incluse.

Préface

Ce manuel de calcul a été réalisé avec le soutien du financement RFCS n°**754092**

Cette nouvelle méthode de calcul a été présentée au groupe d'évolution de l'EN 1993-1-3 en 2016-2017 et, est considérée pour inclusion dans l'EN 1993-1-3.

Ce manuel de calcul a été rédigé par PALISSON Anna et a fait l'objet de discussions au sein d'un groupe de travail, du projet GRISPE PLUS, composé des membres suivants :

Mickael BLANC	France
Silvia CAPRILI	Italie
David IZABEL	France
Markus KUHNENNE	Allemagne
Anna PALISSON	France
Valérie PRUDOR	France
Irene PUNCELLO	Italie
Dominik PYSCHNY	Allemagne
Thibaut RENAUX	France
Daniel SPAGNI	France

Le(s) membre(s) correspondant(s) suivant(s) a(ont) été inclus :

SOKOL	Léopold	France
-------	---------	--------

Figures

Les figures ont été réalisées par les organismes et sociétés suivants:

Figure 1.1.1 – TATA STEEL CONSTRUCTION

Figure 1.3.1 - Sokol Palisson Consultants

Figure 1.3.2 - Sokol Palisson Consultants

Figure 6.2.1 - Sokol Palisson Consultants

Figure 6.3.2.1 - Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 8.1.1 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.1.2 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.1.3 - Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 8.2.1 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.2.2 – Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 8.2.3 – Copie de l'EN 1993-1-3

SOMMAIRE

Domaine d'application de la publication

Notations

1. INTRODUCTION

- 1.1. Type de tôle d'acier profilée concernée**
- 1.2. Etat de l'art avant le projet GRISPE**
- 1.3. Principaux résultats du projet GRISPE**
- 1.4. Exigences et règles générales de dimensionnement**

2. CONSIDERATION PRELIMINAIRE

- 2.1. Champ d'application de la nouvelle méthode de dimensionnement**
- 2.2. Dispositions technologiques pour la tôle d'acier**

3. EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE

4. PROPRIETES DES MATERIAUX

5. ACTIONS ET LEURS COMBINAISONS

6. BASES DU CALCUL

- 6.1. Principes**
- 6.2. Champ d'application de la nouvelle méthode de calcul**
- 6.3. Procédure du dimensionnement**

7. CONSIDERATION DU DIMENSIONNEMENT SPECIFIQUE

8. EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT

- 8.1. Explication du logiciel "outwards stiffener"**
- 8.2. Autocontrôle du logiciel – détails des étapes de calcul**

9. BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE 1

DOMAINE D'APPLICATION DE LA PUBLICATION

Le but de cette publication est de présenter une nouvelle méthode de dimensionnement des plaques nervurées avec raidisseurs extérieurs qui a été proposée pour inclusion dans l'Eurocode EN 1993-1-3.

Ce manuel de calcul traite de situations qui se produisent couramment.

Pour des problèmes spécifiques (cas des ouvertures par exemple) ou pour des situations exceptionnelles (telles que pour le sismique et le feu), il est nécessaire de suivre les clauses correspondantes des Eurocodes et/ou de l'EN 1090-4.

NOTATIONS

Les symboles suivants sont utilisés:

t : épaisseur de calcul

t_{nom} : épaisseur nominale

t_{eff} : épaisseur efficace

h_w : hauteur d'âme

f_{yb} : limite d'élasticité

E : module d'Young

t_{red} : épaisseur réduite

b_{pi} : largeur de référence de la paroi

$b_{i,\text{eff}}$: largeur efficace de la paroi

A_g : aire de la section transversale brute

A_{eff} : aire de la section transversale efficace

z_G : position de l'axe neutre

σ_{xx} : contrainte

χ_d : coefficient de réduction pour la résistance au flambement par distorsion

$M_{c,Rd}$: moment résistant

M_{span} : moment résistant en travée

e_c : distance entre la semelle comprimée et la position de l'axe neutre

s_n : largeur de la partie de l'âme entre la semelle comprimée et la position de l'axe neutre

s_{eff} : largeur efficace de l'âme

W_{eff} : module d'inertie de la section efficace

1. INTRODUCTION

1.1. Type de tôle d'acier profilée concernée

Ce manuel de calcul traite des plaques nervurées avec raidisseurs extérieurs. (Fig. 1.1.1)

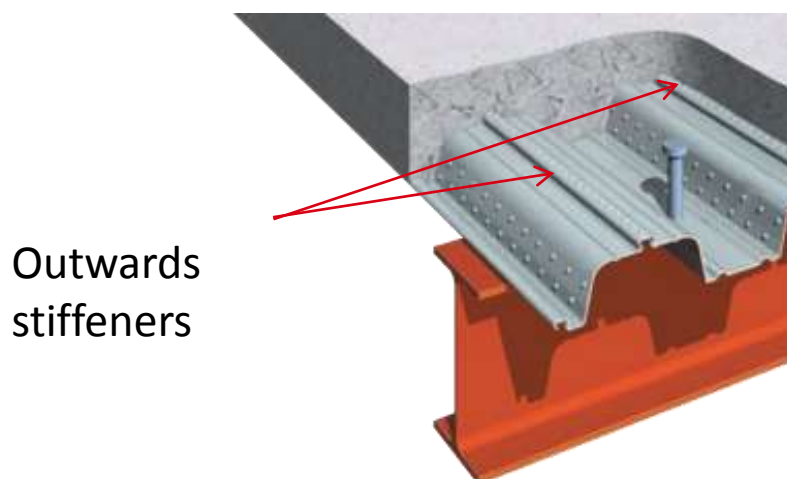


Figure 1.1.1 – Plaques nervurée en acier avec raidisseurs extérieurs

1.2. Etat de l'art avant le projet GRISPE

Les plaques nervurées en acier sont devenues un élément structural intégral dans les dalles collaborantes pour les planchers, avec une variété de formes des nervures de différentes profondeurs.

C'est souvent le matériau privilégié pour l'aménagement intérieur, les rénovations commerciales et industrielles et pour le bâtiment en général car il est robuste, léger et nécessite un entretien limité. Afin d'augmenter la connexion entre l'acier et le béton dans les dalles composites, les plaques nervurées peuvent être équipées de raidisseurs extérieurs dans les semelles supérieures.

Ce type de plaques a été optimisé au fil des ans et de nombreuses formes nouvelles sont apparues sur les marchés.

En phase de construction où la tôle utilisée comme coffrage doit supporter le poids du béton frais et les charges de construction, aucune étude existante ne permet de calculer la résistance au moment des tôles d'acier avec ces raidisseurs extérieurs.

Dans la norme EN 1994-1 relative à la conception des plaques en phase mixte, un lien est établi avec l'EN 1993-1-3. La norme EN 1993-1-3 traite en 1.5.1 (4) des plaques mais dans la section 1.5.2 «Types de raidisseurs», les profils comportant raidisseurs extérieurs utilisés pour les dalles collaborantes ne sont pas traités.

En résumé, dans les textes actuels des Eurocodes, la seule possibilité pour les fabricants de dimensionner cette famille de produits est de réaliser des tests coûteux et chronophages.

1.3. Principaux résultats du projet GRISPE

Afin de déterminer la résistance au moment de flexion des plaques nervurées avec des raidisseurs extérieurs un vaste programme d'essais a été réalisé conformément à la norme EN 1993-1-3 Annexe A sur des plaques nervurées avec des raidisseurs extérieurs (Figure 1.3.1; Figure 1.3.2).

Sur la base des résultats et analyses de ces essais, un modèle de conception innovant a été développé et validé pour déterminer la résistance au moment fléchissant des plaques nervurées avec des raidisseurs extérieurs



Figure 1.3.1 – Essai en travée simple



Figure 1.3.2 – Mode de ruine

1.4. Exigences et règles générales de dimensionnement

(1) La conception des plaques nervurées en acier avec raidisseurs extérieurs doit être conforme aux règles générales données dans la norme EN 1993-1-3

(2) Des coefficients partiels appropriés doivent être adoptés pour les états limites ultimes et pour les états limites de service conformément à l'EN 1993-1-3.

2. CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES

2.1. Champ d'application de la nouvelle méthode de dimensionnement

Ce manuel définit des exigences de calcul pour les plaques nervurées en acier avec raidisseurs extérieurs. L'exécution des structures en acier constituées en plaques nervurées est couverte par l'EN 1090.

Ce manuel donne une méthode pour le dimensionnement par calcul. Cette méthode ne s'applique que dans des gammes bien définies de caractéristiques des matériaux et de proportions géométriques.

Ce manuel ne couvre pas la prise en compte des charges relatives aux phases d'exécution et d'entretien.

Les règles de calcul données dans le présent manuel ne sont applicables que si les tolérances des profilés formés à froid sont conformes à l'EN 1993-1-3.

2.2. Dispositions technologiques pour la tôle d'acier

2.2.1. Types de sections

(1) Les plaques nervurées présentent, dans la limite des tolérances autorisées, une épaisseur nominale constante sur toute leur longueur, et peuvent avoir une section transversale uniforme ou une section de hauteur variable.

(2) Les sections transversales des tôles profilées sont composées pour l'essentiel de parois planes reliées par des éléments courbes.

(3) Les sections transversales des plaques nervurées peuvent être non raidies ou comporter des raidisseurs longitudinaux de leurs âmes.

2.2.2. Dimensions des sections transversales

Les dimensions des sections transversales doivent satisfaire les exigences générales définies par l'EN 1993-1-3, section 1.5.3.

(1) L'épaisseur de métal t est l'épaisseur de calcul (définie si nécessaire par l'épaisseur de métal nu moins la tolérance comme spécifié dans la clause 3.2.4 de l'EN 1993-1-3), sauf indication contraire.

(2) Il convient de ne pas appliquer les dispositions données dans ce manuel pour le dimensionnement par calcul, aux sections transversales dont les rapports largeur sur épaisseur ne se situent pas dans la gamme de valeurs b/t , h/t , c/t and d/t données dans le tableau 2.2.2.1 (Tableau 5.1 de l'EN 1993-1-3).

(3)

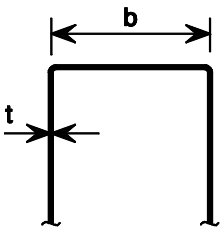
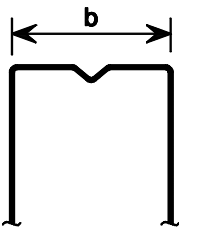
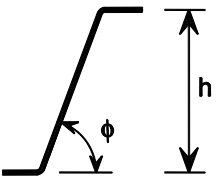
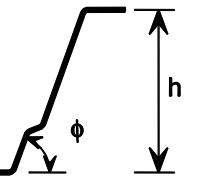
		$b/t \leq 500$
		$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

Tableau 2.2.2.1 – Vérification des proportions géométriques

3. EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE

Plaques nervurées et marquage CE

Les plaques nervurées en acier sont marquées CE selon la norme EN 1090-1.

4. PROPRIETES DES MATERIAUX

Tôles d'acier

Les propriétés des matériaux doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme EN 1993-1-3, section 3.

Les types d'acier habituels sont les nuances S320GD + ZA et S350GD + ZA

Les tolérances des épaisseurs doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme EN 1993-1-3, section 3.2.4.

5. ACTIONS ET LEURS COMBINAISONS

Les actions et leurs combinaisons doivent être prises en compte et déterminées conformément à l'EN 1991-1-6 Eurocode 1: Actions sur les structures, Partie 1-6 : Actions générales – Actions en cours d'exécution, 2005, et leurs Annexes Nationales.

6. BASES DU CALCUL

6.1. Principes

Cette nouvelle méthode de dimensionnement est donnée pour calculer la résistance au moment fléchissant d'une plaque nervurée avec raidisseurs extérieurs.

6.2. Champ d'application de la nouvelle méthode de calcul

Cette nouvelle méthode est donnée pour une plaque nervurée avec raidisseurs extérieurs (Figure (6.2.1)).

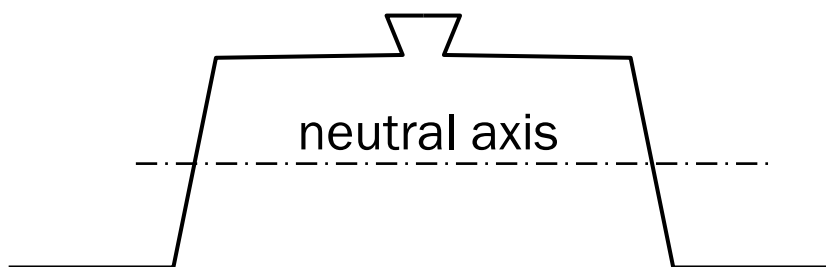


Figure 6.2.1 – Plaque nervurée avec raidisseurs extérieurs

6.3. Procédure du dimensionnement

6.3.1. Section efficace de la plaque avec raidisseurs extérieurs

- (1) La largeur efficace de la paroi plane doit être calculée conformément à 5.5.1 (2) de l'EN 1993-1-3
- (2) Pour les raidisseurs extérieurs pointant vers l'extérieur les calculs doivent être réalisés en prenant la contrainte dans le raidisseur égale à la contrainte dans la semelle supérieure.

6.3.2. Résistance au moment fléchissant d'une plaque nervurée avec raidisseurs extérieurs

Le moment résistant de calcul d'une section transversale soumise à la flexion par rapport à un axe principal $M_{c,Rd}$ est déterminé conformément à l'EN 1993-1-3 "6.1.4 Moment fléchissant", comme suit :

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Il convient de déterminer le module d'inertie de la section efficace W_{eff} à partir d'une section transversale efficace soumise uniquement à un moment fléchissant par rapport à

l'axe principal approprié, avec une contrainte maximale $\sigma_{\max,Ed}$ égale à f_{yb} / γ_{M0} , en tenant compte des effets du flambement local et par distorsion, tels que spécifiés à la Section 5.5. et 7.1 de l'EN 1993-1-3.

7. CONSIDERATION DU DIMENSIONNEMENT SPECIFIQUE

Les domaines suivants ne sont pas traités par le présent manuel :

Le feu

Le séisme

Les aspects environnementaux

La thermique

L'acoustique

Autres

8. EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT

8.1. Explication du logiciel "outwards stiffener"

Ce logiciel permet de calculer la résistance au moment en travée pour une plaque nervurée avec un raidisseur extérieur dans la semelle supérieure et avec deux raidisseurs dans la semelle inférieure.

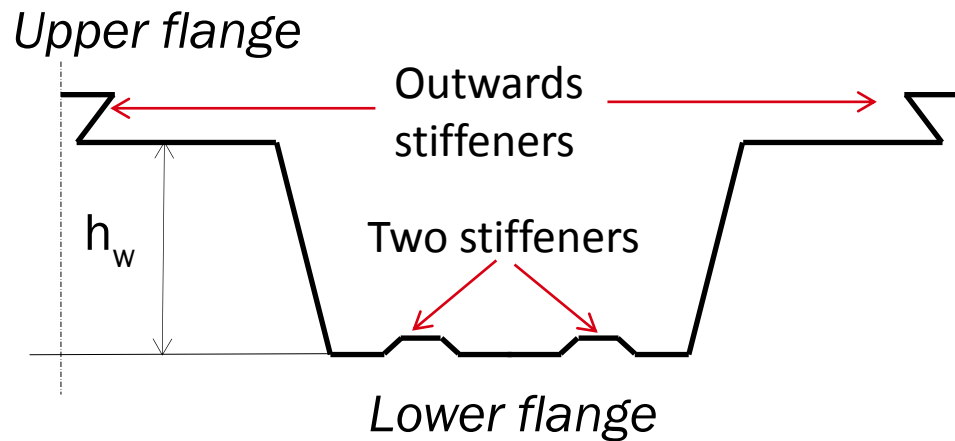


Figure 8.1.1 - Plaque nervurée avec un raidisseur extérieur dans la semelle supérieure et avec deux raidisseurs dans la semelle inférieure

1) DONNEES

Toutes les cellules rouges doivent être complétées avec les dimensions du profil (Figure 8.1.2): les rayons internes R_1 , $R_{2_{sup}}$, $R_{2_{inf}}$, les angles θ_1 and θ_2 , l'épaisseur de calcul t , l'épaisseur nominale t_{nom} , le pas, la hauteur d'âme h_w , la profondeur du raidisseur supérieur d_s , la profondeur du raidisseur inférieur d_i , la limite d'élasticité f_{yb} , le module d'Young E et γ_{M0} .

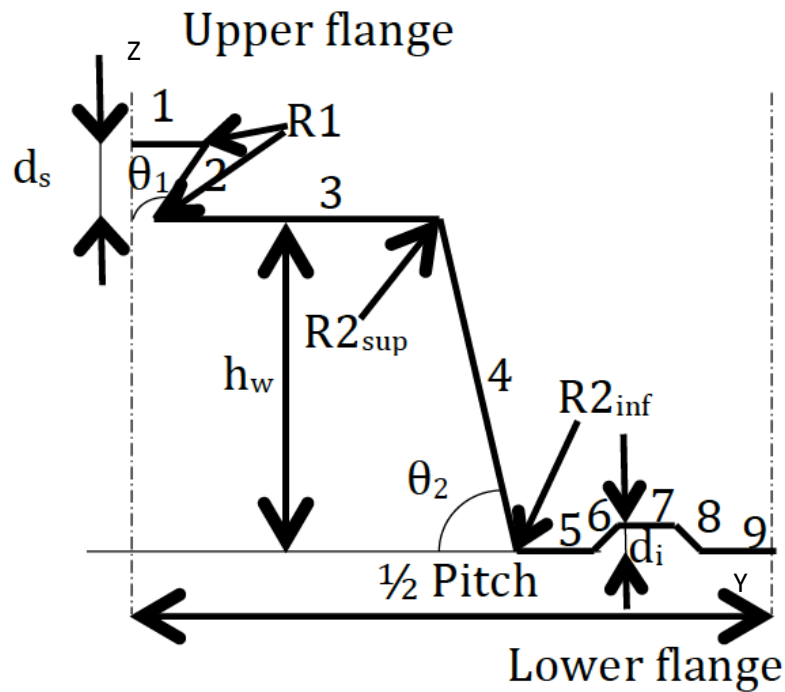


Figure 8.1.2 – Numéros des éléments

R1 (mm)	θ_1 (rad)	R2 _{sup} (mm)	R2 _{inf} (mm)	θ_2 (rad)	t _{nom} (mm)	t (mm)

Pitch (mm)	h _w (mm)	d _s (mm)	d _i (mm)	f _{yb} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	γ_{M0}

Tableau 8.1.1 - Cellules Excel devant être complétées avec les dimensions du pro

Compléter les cellules rouges du tableau suivant avec les dimensions (b_{pi}) des éléments de 1/2 nervure. Les numéros des éléments sont donnés sur la Figure 8.1.2. La longueur des éléments est mesurée entre les points médians « P » des arrondis adjacents comme indiqué sur la Figure 8.1.6.

Element	b_{pi} (mm)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

Tableau 8.1.2 - Cellules Excel à compléter avec les dimensions des éléments

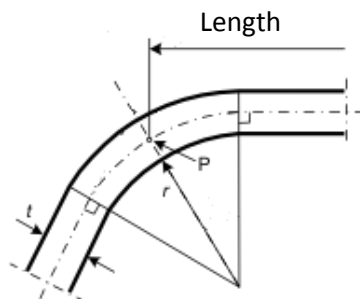


Figure 8.1.3 - Longueur des éléments mesurée entre les points médians « P »

2) Vérification des proportions géométriques

Compléter la cellule rouge avec la valeur de b value et le logiciel affiche automatiquement la vérification des proportions géométriques

			$b/t \leq 500$
b=	75.00		
b/t=	87.21		
$\theta_2=$	79.38		
h/t=	93.02		
$500\sin(\theta_2)=$	491.44		
$r < 1,04 t E / f_y$	15.37		$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
			$h/t \leq 500 \sin\phi$

Tableau 8.1.3 - Vérification automatiques des proportions géométriques

3) RESULTATS

Le logiciel affiche automatiquement les résultats:

⇒ moment résistant en travée **$M_{span} = 13.3 \text{ kNm/m}$**

8.2. Autocontrôle du logiciel – détails des étapes de calcul

L'autocontrôle est basé sur le calcul de la résistance au moment en travée pour un profil d'épaisseur =0,90 mm

1) DONNEES

Logiciel et calcul:

R1 (mm)	θ_1 (rad)	R2 _{sup} (mm)	R2 _{inf} (mm)	θ_2 (rad)	t _{nom} (mm)	t (mm)
0.00	1.89	15.00	5.00	1.39	0.90	0.86
Pitch (mm)	h _w (mm)	d _s (mm)	d _i (mm)	f _{yb} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	γ_{M0}
300.00	80.00	15.00	6.00	450.00	210000.00	1.00

Tableau 8.2.1 - Cellules Excel complétées avec les dimensions du profil

Element	b_{pi} (mm)
1	12.00
2	15.81
3	68.00
4	77.57
5	15.00
6	8.49
7	8.00
8	8.49
9	25.00

Tableau 8.2.2 - Cellules Excel complétées avec les dimensions des éléments

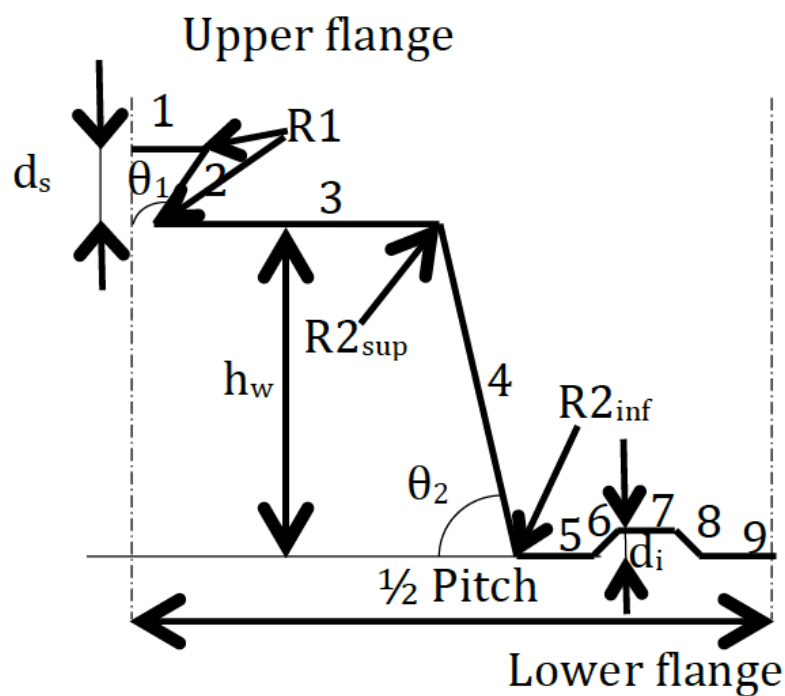


Figure 8.2.1 - Numéros des éléments

2) Vérification des proportions géométriques

Le logiciel affiche automatiquement la vérification des proportions géométriques.

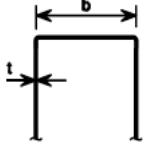
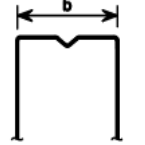
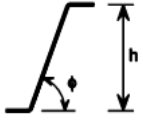
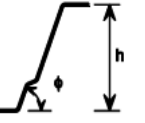
			$b/t \leq 500$
$b =$	75.00		
$b/t =$	87.21		
$\theta_2 =$	79.38		
$h/t =$	93.02		
$500 \sin(\theta_2) =$	491.44		
$r < 0,04 t E / f_y$	16.05		$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
			$h/t \leq 500 \sin \phi$

Tableau 8.2.3 - Vérification automatiques des proportions géométriques

3) RESULTATS

Logiciel:

⇒ Moment résistant en travée

$M_{span} = 13.3 \text{ kNm/m}$

Calcul:

Calcul de l'aire de la section transversale brute A_g

A_g est la somme des aires de chaque élément (longueur x t)

$$A_g = 206.8 \text{ mm}^2$$

Position de l'axe neutre: $z_G = 46.6 \text{ mm}$

Calcul de l'aire de la section transversale efficace A_{eff} :

1^{ère} Etape

A_{eff} est la somme des aires des sections efficaces des éléments

Aire de la section transversale efficace de la semelle supérieure

La semelle supérieure possède 2 raidisseurs donc la section transversale efficace de la semelle est calculée conformément à l'EN 1993-1-3 § "5.5.3.4.2 Semelles munies de raidisseurs intermédiaires"

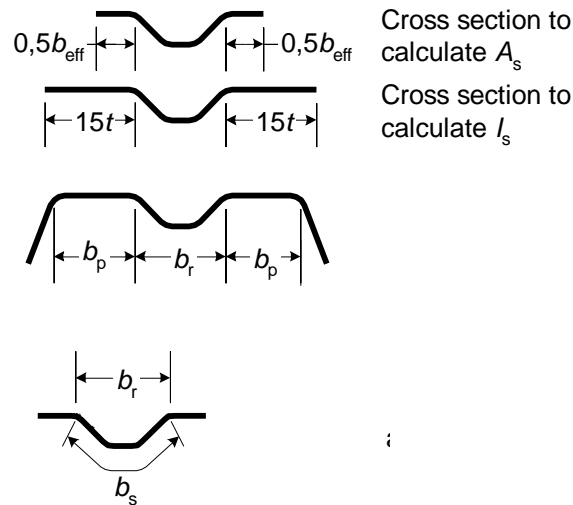


Figure 8.2.2 - Semelle avec un raidisseur

La contrainte dans la semelle supérieure est $\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 323 \text{ N} / \text{mm}^2$

$b_p = 68 \text{ mm}$, $\rho = 0.57 \rightarrow 0,5 b_{eff} = 19.39 \text{ mm}$

Raidisseurs:

La section transversale d'un raidisseur est calculée conformément à l'EN 1993-1-3 § "5.5.3.3 Parois munies de raidisseurs intermédiaires »

Contrainte critique de flambement $\sigma_{cr,s} = 325 \text{ N/mm}^2$

Coefficient de réduction pour la résistance au flambement par distorsion $\chi_d = 0,619$

Aire de la section transversale efficace de l'âme

L'aire de la section efficace de l'âme est calculée conformément à la section "5.5.3.4.3 Ames avec au plus deux raidisseurs intermédiaires" de l'EN 1993-1-3

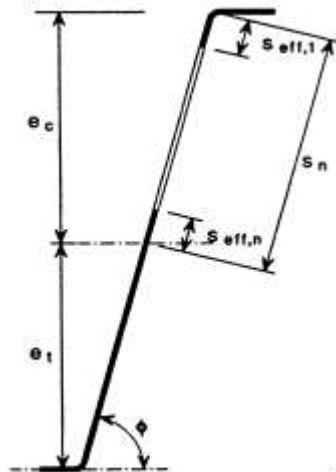


Figure 8.2.3 - Section transversale efficace de l'âme

$$e_c = h_w - z_G = 33.4 \text{ mm} \rightarrow s_n = 31.1 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{com}} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 323 \text{ N / mm}^2 \rightarrow s_{\text{eff},0} = 20,84 \text{ mm} \rightarrow s_{\text{eff},1} = 20,84 \text{ mm} \rightarrow s_{\text{eff},n} = 31,26 \text{ mm} \rightarrow s_{\text{eff},1} + s_{\text{eff},n} \geq s_n \text{ l'âme est pleinement efficace}$$

$$s_{\text{eff},1} = 0,4s_n$$

$$s_{\text{eff},n} = 0,6s_n$$

Aire de la section transversale efficace de la semelle inférieure

Dans ce cas la semelle inférieure est en tension \rightarrow aire de la section efficace = aire de la section brute

Aire de la section transversale efficace totale

$$A_{\text{eff}} = 176.2 \text{ mm}^2$$

La position de l'axe neutre de la section efficace est: $z_G = 40.57 \text{ mm}$

Iteration: étapes suivantes

Dans les étapes suivantes la nouvelle position de l'axe neutre de la section efficace est prise pour calculer la nouvelle contrainte σ_{com} .

L'aire de la section transversale efficace de la semelle supérieure est calculée comme dans l'étape 1 mais en prenant la nouvelle contrainte σ_{com} calculée avec la nouvelle position de l'axe neutre z_c

L'aire de la section transversale efficace de l'âme est calculée comme dans l'étape 1 mais en prenant la nouvelle contrainte σ_{com} calculée avec la nouvelle position de l'axe neutre z_c .

Toutes les valeurs des étapes 2, 3 et 4 sont indiquées dans le tableau suivant. La convergence est considérée satisfaisante à l'étape 4, l'itération s'arrête à l'étape 4.

		2nd step	3rd step	4th step
Upper flange	σ_{com}	437	450	450
	ρ	0.469	0.460	0.460
	$0,5 b_{1,eff}$	15.96	15.63	15.63
Upper flange	$\sigma_{cr,s}$	350.22	352.81	352.81
	χ_d	0.65	0.65	0.65
	t_{red}	0.58	0.56	0.56
Web	e_c	39.4	39.4	39.4
	s_n	37.2	37.2	37.2
	$s_{eff,0}$	17.9	17.9	17.9
	$s_{eff,1}$	17.9	17.9	17.9
	$s_{eff,n}$	26.9	26.9	26.9
	$s_{eff,1} + s_{eff,n}$	44.8	44.8	44.8
		entire web is effective	entire web is effective	entire web is effective
	$s_{eff,1}$	0,4sn	0,4sn	0,4sn
	$s_{eff,n}$	0,6sn	0,6sn	0,6sn
Total effective	A_{eff}	163.4	162.3	162.3
Position of ne	z_c	37.2	36.9	36.9

Tableau 8.2.4 – Valeurs des étapes 2, 3 et 4

Calcul de la résistance au moment en travée:

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Pour 1/2 pas $I_{eff} = 191665 \text{ mm}^4$

Pour le profil $I_{eff} = 1278 \text{ mm}^3$

$v = \max(36.9; 43.1) = 43.1 \text{ mm}$

$W_{eff} = I_{eff} / v = 29.6 \text{ mm}^3$

$$M_{span} = 13.3 \text{ kNm/m}$$

$$M_{span} = 13.3 \text{ kNm/m}$$

Le résultat est identique au résultat du logiciel

Annexe 1

Background pour la nouvelle méthode de dimensionnement des plaques nervurées avec bossages

D1.1	GRISPE WP1 Background document	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.2	GRISPE WP1 Test programme definition	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.3	GRISPE Test report of steel trapezoidal sheeting with and without embossments and outward stiffeners	Christian FAUTH (KIT)
D1.4	GRISPE WP1 Test analysis and interpretation	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.6	GRISPE Background guidance for EN 1993-1-3 to design of special shape sheeting (with outwards stiffeners in the flange)	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)

PARTIE 2: EXEMPLE PRATIQUE POUR LES PLAQUES NERVUREES AVEC RAIDISSEURS EXTERIEURS

SUMMARY

L'objectif de cet exemple pratique est de présenter une nouvelle méthode analytique de dimensionnement des plaques nervurées avec raidisseurs extérieurs, développée durant le projet Européen GRISPE.

Cet exemple pratique est basé sur les principes des Eurocodes en général et plus spécifiquement sur ceux des normes EN 1993-1-3 et EN 1993-1-5.

Cette nouvelle méthode analytique de dimensionnement de plaques nervurées avec raidisseurs extérieurs est basée sur des essais réalisés dans le cadre du projet Européen GRISPE (2013-2016).

Le background de cette méthode est décrit dans l'Annexe 1.

Le chapitre 1 détaille la section transversale de la plaque nervurée.

Le chapitre 2 explique le calcul de la section transversale brute.

Le chapitre 3 explique le calcul de la section transversale efficace.

Le chapitre 4 explique le calcul de la résistance au moment fléchissant.

Préface

Cet exemple pratique a été réalisé avec le soutien du financement RFCS n°**754092**

Cette nouvelle méthode de calcul a été présentée au groupe d'évolution de l'EN 1993-1-3 en 2016-2017 et, est considérée pour inclusion dans l'EN 1993-1-3.

Cet exemple pratique a été rédigé par PALISSON Anna et a fait l'objet de discussions au sein d'un groupe de travail, du projet GRISPE PLUS, composé des membres suivants :

Mickael BLANC	France
Silvia CAPRILI	Italie
David IZABEL	France
Markus KUHNENNE	Allemagne
Anna PALISSON	France
Valérie PRUDOR	France
Irene PUNCELLO	Italie
Dominik PYSCHNY	Allemagne
Thibaut RENAUX	France
Daniel SPAGNI	France

Le(s) membre(s) correspondant(s) suivant(s) a(ont) été inclus :

SOKOL	Léopold	France
-------	---------	--------

Figures

Les figures ont été réalisées par les organismes et sociétés suivants:

Figure 1.1 - Sokol Palisson Consultants

Figure 1.1.1 - Sokol Palisson Consultants

Figure 2.1 - Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 3.1.1 - Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 3.1.2 - Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 3.1.3 - Sokol Palisson Consultants

SOMMAIRE

DOMAINE D'APPLICATION DE LA PUBLICATION

Notations

1. INTRODUCTION

- 1.1. Section transversale de la plaque nervurée
- 1.2. Caractéristiques de la plaque nervurée

2. CALCUL DE L'AIRE DE LA SECTION TRANSVERSALE BRUTE A_g

3. CALCUL DE L'AIRE DE LA SECTION TRANSVERSALE EFFICACE A_{eff}

- 3.1. Etape 1
- 3.2. Itération: Etape 2
- 3.3. Itération: Etape 3

4. CALCUL DU MOMENT RESISTANT

ANNEXE 1

DOMAINE D'APPLICATION DE LA PUBLICATION

Le but de cette publication est de présenter une nouvelle méthode de dimensionnement des plaques nervurées avec raidisseurs extérieurs qui a été proposée pour inclusion dans l'Eurocode EN 1993-1-3.

Cet exemple pratique traite de situations qui se produisent couramment.

Pour des problèmes spécifiques (cas des ouvertures par exemple) ou pour des situations exceptionnelles (telles que pour le sismique et le feu), il est nécessaire de suivre les clauses correspondantes des Eurocodes et/ou de l'EN 1090-4.

NOTATIONS

Les symboles suivants sont utilisés:

t : épaisseur de calcul

t_{nom} : épaisseur nominale

t_{eff} : épaisseur efficace

h_w : hauteur d'âme

f_{yb} : limite d'élasticité

E : module d'Young

t_{red} : épaisseur réduite

b_{pi} : largeur de référence de la paroi

$b_{i,\text{eff}}$: largeur efficace de la paroi

A_g : aire de la section transversale brute

A_{eff} : aire de la section transversale efficace

z_G : position de l'axe neutre

σ_{xx} : contrainte

χ_d : coefficient de réduction pour la résistance au flambement par distorsion

$M_{c,Rd}$: moment résistant

M_{span} : moment résistant en travée

e_c : distance entre la semelle comprimée et la position de l'axe neutre

s_n : largeur de la partie de l'âme entre la semelle comprimée et la position de l'axe neutre

s_{eff} : largeur efficace de l'âme

W_{eff} : module d'inertie de la section efficace

1. INTRODUCTION

Cet exemple montre comment traiter les plaques nervurées avec des raidisseurs extérieurs dans la semelle supérieure lorsqu'on détermine la résistance en flexion d'une plaque avec deux raidisseurs dans la semelle inférieure.

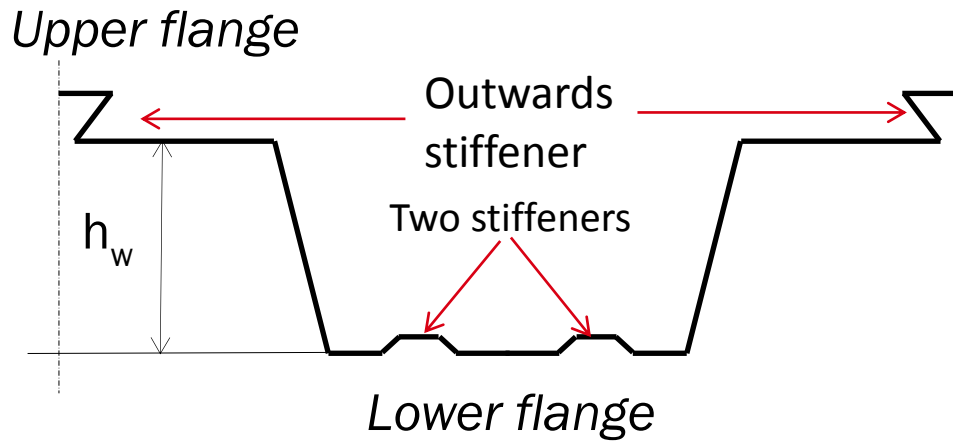


Figure 1.1 - - Plaque nervurée avec un raidisseur extérieur dans la semelle supérieure et avec deux raidisseurs dans la semelle inférieure

1.1. Section transversale de la plaque nervurée

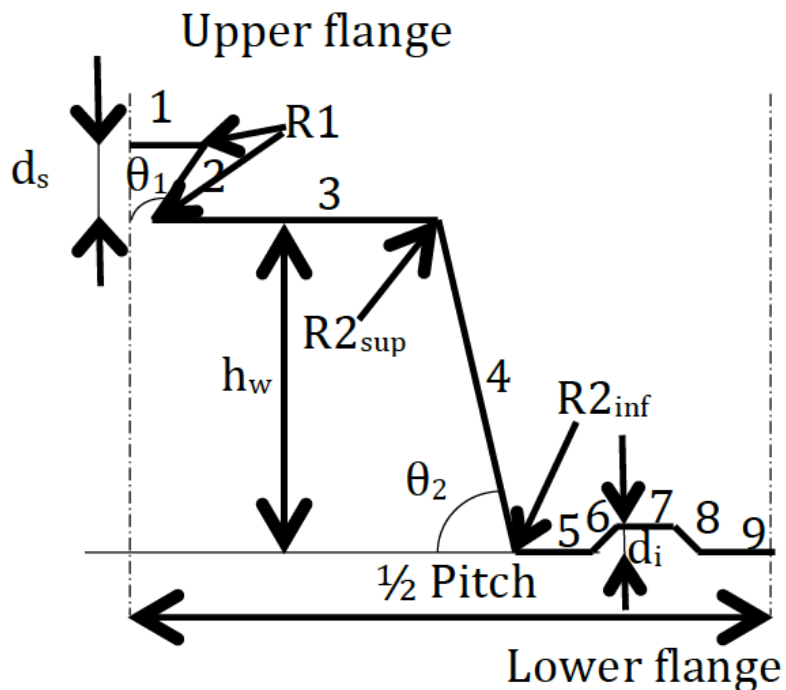


Figure 1.1.1 - Numéros des éléments

1.2. Caractéristiques de la plaque nervurée

Cet exemple est basé sur le calcul de la résistance au moment en travée pour un profil ayant les caractéristiques suivantes:

R1 (mm)	θ_1 (rad)	R2 _{sup} (mm)	R2 _{inf} (mm)	θ_2 (rad)	t _{nom} (mm)	t (mm)
0.00	1.89	15.00	5.00	1.39	0.90	0.86

Pitch (mm)	h _w (mm)	d _s (mm)	d _i (mm)	f _{yb} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	γ_{M0}
300.00	80.00	15.00	6.00	450.00	210000.00	1.00

Tableau 1.2.1 - Caractéristiques de la plaque nervurée

Element	b _{pi} (mm)
1	12.00
2	15.81
3	68.00
4	77.57
5	15.00
6	8.49
7	8.00
8	8.49
9	25.00

Tableau 1.2.2 - Dimensions des éléments

Vérification des proportions géométriques

b = 75; t = 0.86; h = 60; f_y = 450

b=	75.00		b/t ≤ 500
b/t=	87.21		
θ_2 =	79.38		45° ≤ φ ≤ 90°
h/t=	93.02		
500sin(θ ₂)=	491.44		h/t ≤ 500 sin φ
r < 1,04 t E / f _y	16.05		

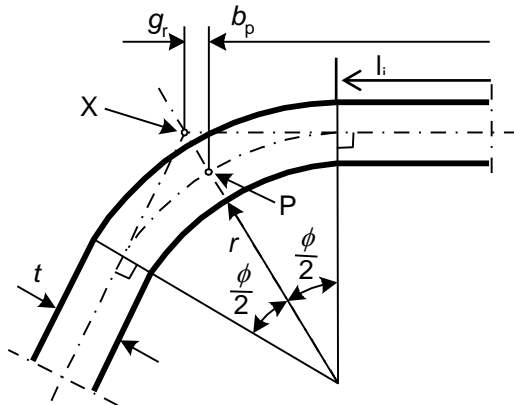
Tableau 1.2.3 - Vérification des proportions géométriques

2. CALCUL DE L'AIRE DE LA SECTION TRANSVERSALE BRUTE

A_g

A_g est la somme des aires de chaque élément (longueur x t)

longueur = $l_i = b_p - r_m \times \sin\pi/4$



(a) midpoint of corner or bend

X is intersection of midlines

P is midpoint of corner

$$r_m = r + t/2$$

Figure 2.1 - Largeurs de référence des sections transversales de parois b_p tenant compte des rayons d'arrondi

Element	l_i (mm)	A_i (mm ²)	z (mm)	S_i (mm ³)	z_0 (mm)
1	12.0	10.3	95.0	980.40	-48.41
Corner 1 _{sup}	0.0	0.0	95.0	0.00	-48.41
2	15.8	13.6	87.5	1189.81	-40.91
Corner 1 _{inf}	0.0	0.0	80.0	0.00	-33.41
3	58.4	50.2	80.0	4019.33	-33.41
Corner 2 _{sup}	20.8	17.9	75.6	1351.88	-29.05
4	64.8	55.7	35.9	2001.69	10.67
Corner 2 _{inf}	6.9	6.0	1.5	8.66	45.14
5	11.8	10.2	0.0	0.00	46.59
6	8.5	7.3	3.0	21.89	43.59
7	8.0	6.9	6.0	41.28	40.59
8	8.5	7.3	3.0	21.89	43.59
9	25.0	21.5	0.0	0.00	46.59
TOTAL		206.8		9636.8	46.6

Tableau 2.1 - Dimensions des éléments

$$A_g = 206.8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Position de l'axe neutre: } z_G = S / A_g = 46,6 \text{ mm}$$

3. CALCUL DE L'AIRES DE LA SECTION TRANSVERSALE EFFICACE A_{eff}

A_{eff} est la somme des aires efficaces de chaque élément.

3.1. Etape 1

Aire de la section transversale efficace de la semelle supérieure

La semelle supérieure possède un raidisseur extérieur. La section transversale efficace de la semelle est calculée conformément à l'EN 1993-1-3 § "5.5.3.4.2 Semelles munies de raidisseurs intermédiaires"

Avec la contrainte dans le raidisseur extérieur égale à la contrainte dans la semelle supérieure.

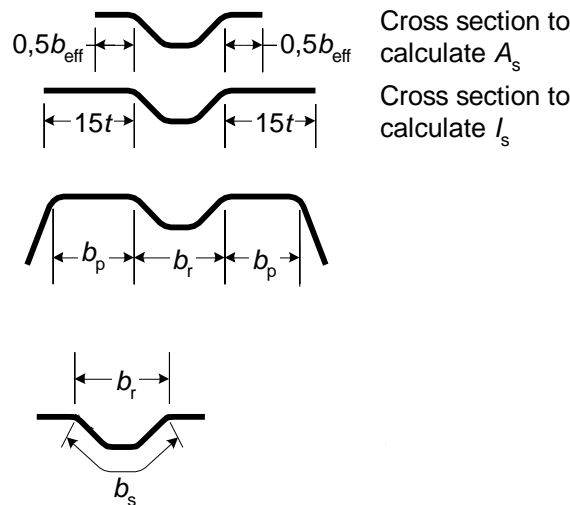


Figure 3.1.1 - Semelle avec un raidisseur

La contrainte dans la semelle supérieure est $\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 323 \text{ N} / \text{mm}^2$

$b_p = 68 \text{ mm}$

$$\lambda_p = b_p / t / (28.4 \varepsilon k_\sigma^{1/2}) \text{ with } \varepsilon = (235 / f_{yb})^{1/2}$$

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = 1 \rightarrow \text{Coefficient } k_\sigma = 4$$

$$\lambda_p = 1.926$$

$$\lambda_{pred} = \lambda_p \times \sqrt{\frac{\sigma_{com}}{f_y / \gamma_{M0}}} \rightarrow \lambda_{pred1} = 1.631$$

$$\lambda_{pred} > 0.673 \rightarrow \rho = \frac{1 - 0.055(3 + \psi) / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0.18 \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0.6)} \rightarrow \rho = 0.57$$

$$b_{\text{eff}} = \rho * b_p = 38.8 \rightarrow \boxed{0,5 b_{\text{eff}} = 19.4 \text{ m}}$$

Raidisseurs dans la semelle supérieure:

La section transversale d'un raidisseur est calculée conformément à l'EN 1993-1-3 § "5.5.3.3 Parois munies de raidisseurs intermédiaires »

Calcul de la contrainte critique de flambement $\sigma_{cr,s}$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4 b_p^2 (2 b_p + 3 b_s)}}$$

$b_s = 55.6 \text{ mm}, b_p = 68 \text{ mm}$

Calcul de A_s

Element	l_i (mm)	A_i (mm ²)
plane part	19.39	16.68
Corner l_{inf}	0.00	0.00
2	15.81	13.60
Corner l_{sup}	0.00	0.00
1	24.00	20.64
Corner l_{sup}	0.00	0.00
2	15.81	13.60
Corner l_{inf}	0.00	0.00
plane part	19.39	16.68
TOTAL		81.2

Tableau 3.1.1 - Longueur et aire des éléments

$A_s = 81.2 \text{ mm}^2$

Calcul de I_s

Element	l_i (mm)	A_i (mm ²)	z (mm)	S_i (mm ³)	$z0$ (mm)	h	I_i (mm ⁴)
plane part	12.90	11.09	0.00	0.00	7.33	0.86	597.44
Corner l_{inf}	0.00	0.00	0.00	0.00	7.33	0.00	0.00
2	15.81	13.60	7.50	101.98	-0.17	15.00	255.33
Corner l_{sup}	0.00	0.00	15.00	0.00	-7.67	0.00	0.00
1	24.00	20.64	15.00	309.60	-15.33	1.72	1214.17
Corner l_{sup}	0.00	0.00	15.00	0.00	-7.67	0.00	0.00
2	15.81	13.60	7.50	101.98	-0.17	15.00	255.33
Corner l_{inf}	0.00	0.00	0.00	0.00	7.33	0.00	0.00
plane part	12.90	11.09	0.00	0.00	7.33	0.86	597.44
TOTAL		70.0		513.6	7.33		2919.7

Tableau 3.1.2 - Longueur et moment d'inertie des éléments

$I_s = 2919.7 \text{ mm}^4$

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2 b_p + 3 b_s)}{t^3}}$$

$$l_b = 869.3$$

$$s_w = 73.7$$

$$l_b/s_w = 11.8 \geq 2 \rightarrow k_w = k_{wo}$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{s_w + 2 b_d}{s_w + 0,5 b_d}}$$

$$b_d = 2b_p + b_s = 191.6 \text{ mm}$$

$$k_{wo} = 1.64$$

$$\boxed{\text{contrainte critique de flambement } \sigma_{cr,s} = 324.7 \text{ N/mm}^2}$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}}$$

$$\lambda_d = 1.177$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d$$

$$\boxed{\text{Coefficient de réduction pour la résistance au flambement par distorsion } \chi_d = 0,619}$$

$$\text{Epaisseur réduite } t_{red} = C_d t \frac{f_{yb}/g_{M0}}{S_{com,Ed}}$$

$$\boxed{\text{Epaisseur réduite } t_{red} = 0.74 \text{ mm}}$$

Aire de la section transversale efficace de l'âme

L'aire de la section efficace de l'âme est calculée conformément à la section "5.5.3.4.3 Ames avec au plus deux raidisseurs intermédiaires" de l'EN 1993-1-3

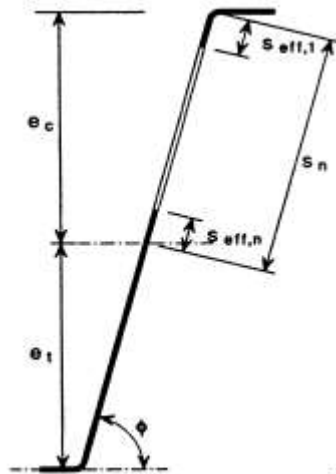


Figure 3.1.2 - Section transversale efficace de l'âme

$$e_c = h_w - z_G = 33.4 \text{ mm} \rightarrow s_n = 31.1 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{com}} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 323 \text{ N / mm}^2$$

Les valeurs de la section efficace sont définies itérativement →

$$s_{\text{eff},0} = 0,95 t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{\text{com,Ed}}}}$$

$$\rightarrow s_{\text{eff},0} = 20,84 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},1} = s_{\text{eff},0} \rightarrow s_{\text{eff},1} = 20,84 \text{ mm}$$

$s_{\text{eff},n} = 1.5 s_{\text{eff},0} \rightarrow s_{\text{eff},n} = 31.26 \text{ mm} \rightarrow s_{\text{eff},1} + s_{\text{eff},n} \geq s_n$ l'âme est pleinement efficace

$$s_{\text{eff},1} = 0,4s_n$$

$$s_{\text{eff},n} = 0,6s_n$$

Aire de la section transversale efficace de la semelle inférieure

Dans ce cas la semelle inférieure est en tension → toute la largeur est efficace

Aire de la section transversale efficace totale

Calcul de A_{eff}

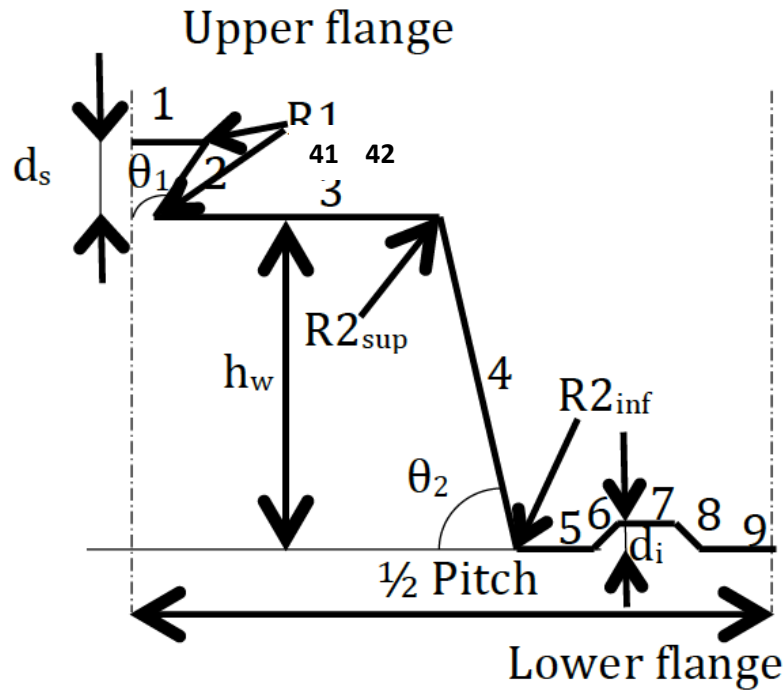


Figure 3.1.3 - Numéros des éléments

Element	l_i (mm)	t_{eff} (mm)	A_i (mm ²)	z (mm)	S_i (mm ³)	$z0$ (mm)
1	12.0	0.7	8.9	95.0	846.1	-54.4
Corner 1 _{sup}	0.0	0.7	0.0	95.0	0.0	-54.4
2	15.8	0.7	11.7	87.5	1026.8	-46.9
Corner 1 _{inf}	0.0	0.7	0.0	80.0	0.0	-39.4
31	19.4	0.7	14.4	80.0	1151.5	-39.4
32	9.8	0.9	8.4	80.0	675.2	-39.4
Corner 2 _{sup}	20.8	0.9	17.9	75.6	1351.9	-35.1
4	64.8	0.9	55.7	35.9	2001.7	4.6
Corner 2 _{inf}	6.9	0.9	6.0	1.5	8.7	39.1
5	11.8	0.9	10.2	0.0	0.0	40.6
6	8.5	0.9	7.3	3.0	21.9	37.6
7	8.0	0.9	6.9	6.0	41.3	34.6
8	8.5	0.9	7.3	3.0	21.9	37.6
9	25.0	0.9	21.5	0.0	0.0	40.6
TOTAL			176.2		7147.0	40.6

Tableau 3.1.3 - Longueur et aire des éléments

$A_{eff} = 176.2 \text{ mm}^2$

Position de l'axe neutre de la section efficace: $z_G = 40,6 \text{ mm}$

3.2. Itération: Etapes suivantes

Dans l'étape suivante la nouvelle position de l'axe neutre de la section efficace est prise pour calculer la nouvelle contrainte σ_{com} .

L'aire de la section transversale efficace de la semelle supérieure est calculée comme dans l'étape 1 mais en prenant la nouvelle contrainte σ_{com} calculée avec la nouvelle position de l'axe neutre z_c

Aire de la section transversale efficace de l'âme est calculée comme dans l'étape 1 mais en prenant la nouvelle contrainte σ_{com} calculée avec la nouvelle position de l'axe neutre z_c

Aire de la section transversale efficace de la semelle inférieure

Dans ce cas la semelle inférieure est en tension → toute la largeur est efficace

Toutes les valeurs des étapes 2, 3 et 4 sont indiquées dans le tableau suivant. La convergence est considérée satisfaisante à l'étape 4, l'itération s'arrête à l'étape 4.

		2nd step	3rd step	4th step
Upper flange	σ_{com}	437	450	450
	ρ	0.469	0.460	0.460
	$0,5 b_{1,eff}$	15.96	15.63	15.63
Upper flange	$\sigma_{cr,s}$	350.22	352.81	352.81
	χ_d	0.65	0.65	0.65
	t_{red}	0.58	0.56	0.56
Web	e_c	39.4	39.4	39.4
	s_n	37.2	37.2	37.2
	$S_{eff,0}$	17.9	17.9	17.9
	$S_{eff,1}$	17.9	17.9	17.9
	$S_{eff,n}$	26.9	26.9	26.9
	$S_{eff,1} + S_{eff,n}$	44.8	44.8	44.8
		entire web is effective	entire web is effective	entire web is effective
	$S_{eff,1}$	0,4sn	0,4sn	0,4sn
$S_{eff,n}$	0,6sn	0,6sn	0,6sn	
Total effective	A_{eff}	163.4	162.3	162.3
Position of ne	z_c	37.2	36.9	36.9

Tableau 3.2.1 – Valeurs des étapes 2, 3, 4

4. CALCUL DU MOMENT RESISTANT

Le moment résistant est calculé avec les valeurs de l'étape 4.

Element	I_i (mm)	t_{eff} (mm)	A_i (mm ²)	z (mm)	S_i (mm ³)	$z0$ (mm)	h	I_i (mm ⁴)
1	12.0	0.6	6.7	95.0	640.7	-58.1	0.9	22784.9
Corner 1 _{sup}	0.0	0.6	0.0	95.0	0.0	-58.1	0.0	0.0
2	15.8	0.6	8.9	87.5	777.5	-50.6	15.0	22940.3
Corner 1 _{inf}	0.0	0.6	0.0	80.0	0.0	-43.1	0.0	0.0
31	15.6	0.6	8.8	80.0	702.9	-43.1	0.9	16341.2
32	6.1	0.9	5.2	80.0	416.6	-43.1	0.9	9684.5
Corner 2 _{sup}	20.8	0.9	17.9	75.6	1351.9	-38.8	0.0	27109.4
4	64.8	0.9	55.7	35.9	2001.7	1.0	63.7	18884.8
Corner 2 _{inf}	6.9	0.9	6.0	1.5	8.7	35.4	0.0	7484.0
5	11.8	0.9	10.2	0.0	0.0	36.9	0.9	13807.1
6	8.5	0.9	7.3	3.0	21.9	33.9	8.5	8417.3
7	8.0	0.9	6.9	6.0	41.3	30.9	0.9	6558.7
8	8.5	0.9	7.3	3.0	21.9	33.9	8.5	8417.3
9	25.0	0.9	21.5	0.0	0.0	36.9	0.9	29235.5
TOTAL			162.3		5984.9	36.9		191664.9

Tableau 4.1 – Valeurs de l'étape 4

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Pour 1/2 pas $I_{eff} = 191665 \text{ mm}^4$

Pour le profil $I_{eff} = 1278 \text{ mm}^3$

$v = \max(36.9; 43.1) = 43.1 \text{ mm}$

$W_{eff} = I_{eff} / v = 29.6 \text{ mm}^3$

$M_{span} = 13.3 \text{ kNm/m}$

Annexe 1

Background pour la nouvelle méthode de dimensionnement des plaques nervurées avec raidisseurs extérieurs

D1.1	GRISPE WP1 Background document	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.2	GRISPE WP1 Test programme definition	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.3	GRISPE Test report of steel trapezoidal sheeting with and without embossments and outward stiffeners	Christian FAUTH (KIT)
D1.4	GRISPE WP1 Test analysis and interpretation	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.6	GRISPE Background guidance for EN 1993-1-3 to design of special shape sheeting (with outwards stiffeners in the flange)	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)